ENDEAVOUR

Revue trimestrielle destinée à tenir registre du progrès
des sciences au service du genre humain

VOLUME XV Octobre 1956 NUMÉRO 60

SOMMAIRE

070.432:5.001.6
Article de Tête: L'organisation dans la recherche scientifique 175

591.175:577.12:547.962.4
La contraction musculaire — H. E. HUXLEY — 177

92:51/53:550.38
Edmond Halley (1656–1742) — SIR EDWARD BULLARD — 189

531.391:629.1.012
Aspects dynamiques du pneu — G. TEMPLE — 200

539.16.08
La chambre à bulles — C. DODD — 206

561:581.821.1
La cuticule des plantes fossiles — T. M. HARRIS — 210

597.3/.5:591.175.1:537.52
La production d'électricité par les poissons — R. D. KEYNES — 215

049.3
Revue des livres 222

Livres reçus 227

Notes biographiques sur les collaborateurs 228

Rédacteur en chef: TREVOR I. WILLIAMS, M.A., B.Sc., D.Phil., F.R.I.C.
Pour les éditions étrangères: J. A. WILCKEN, B.Sc., Ph.D.

Imperial Chemical Industries Limited, Millbank, Londres, S.W.1
Prière d'adresser toute correspondance à la rédaction, North Block, Thames House, Millbank, Londres, S.W.1

L'organisation dans la recherche scientifique

Les sciences progressent à une telle allure que, selon toutes apparences, elles risquent d'être paralysées par l'ampleur même de leurs acquisitions à moins qu'on y remédie énergiquement. Il arrive, par exemple, assez souvent que faute de ressources matérielles il est difficile, sinon impossible, de mettre à profit une découverte nouvelle. Il y a actuellement une telle masse de publications que les savants, même étroitement spécialisés, trouvent à peine le temps de lire toute la littérature qui se rapporte à leur spécialité. De nouvelles revues sortent constamment; celles qui existent augmentent de volume, et le nombre de livres nouveaux s'accroît de jour en jour; il est donc inévitable que la documentation devienne de plus en plus difficile, à moins qu'on n'adopte des mesures absolument sans précédent en vue d'une meilleure diffusion de nos connaissances. Les acquisitions nouvelles s'accumulent trop vite pour que les chercheurs, même ceux du domaine auquel elles appartiennent, puissent se les assimiler; il n'est donc guère surprenant que leur application en soit retardée davantage, car en thèse générale la transformation d'une théorie en un procédé industriel rentable demande du temps et du travail, outre des recherches supplémentaires. On dit souvent que si l'on cessait actuellement toute recherche en science il resterait encore une provision d'idées assez ample pour que leur développement occupe encore bien des années.

La question de savoir où doit s'arrêter la science, c'est-à-dire celle des limites de la compréhension humaine, relève de la philosophie et n'a aucune importance pratique immédiate, étant donné que ces limites semblent se situer bien au delà de nos possibilités actuelles. Dans les circonstances présentes, cependant, au moment où l'avenir de notre civilisation dépend entièrement de la science et de ses applications, il y a un aspect du problème qui revêt une importance capitale: comment, avec des ressources limitées, activer efficacement la recherche, pure et appliquée?

La lacune la plus grave ici est le manque de personnel scientifique. Dans d'autres pays on s'emploie d'urgence à y remédier, mais il y a des limites à l'accroissement de cet élément; tout le monde n'a pas la vocation et l'on ne peut non plus, sans bouleverser la vie du pays, orienter plus d'une certaine proportion de la population vers les occupations scientifiques. Si donc nous ne pouvons accroître indéfiniment nos effectifs scientifiques et techniques, nous devons du moins tâcher d'augmenter la productivité de ceux que nous avons. C'est un principe déjà accepté, et son application dans plusieurs secteurs de l'industrie a déclenché une véritable révolution industrielle. Le gros public, qui vient de s'en apercevoir, s'émeut de ses conséquences sociales et politiques éventuelles.

Le mot «révolution» s'applique mal au mouvement industriel qui prit naissance en Angleterre au XVIIIe siècle, car il sous-entend un bouleversement soudain qui en réalité ne s'est jamais produit. Il y eut certes des changements d'une très grande portée, mais ils se produisirent graduellement, sans commotions violentes. De même, au début du présent siècle, l'introduction du travail à la chaîne et de la production en série qui devaient, selon certains, entraîner le chômage en masse, se passa presque sans heurts. On s'aperçut bientôt que, loin d'en être diminuée, la demande pour la main-d'œuvre avait en fait augmenté.

Or, à deux siècles de distance, nous voici dans la première phase d'une seconde «révolution industrielle» qui rappelle la première par son ampleur et son caractère graduel. La première débarrassa l'industrie des plus lourdes tâches manuelles et la seconde vise à éliminer la plupart des besognes fastidieuses. Pour l'instant ce mouvement est appelé «automatisme», assez improprement d'ailleurs. Il s'applique communément à la mécanisation intensive des opérations industrielles répétées, au cours desquelles des dispositifs incorporés aux machines corrigent automatiquement tout écart de fonctionnement. Toutefois certains considèrent cette mécanisation automatique comme un accessoire de l'automatisme proprement dit qui, au sens le plus large, doit signifier l'organisation d'opérations d'une grande complexité de telle manière qu'elles puissent être accomplies par des ouvriers non-spécialisés.

Le mouvement, de l'avis général concerne seulement l'industrie et on ne s'est guère soucié de son apport éventuel à la science; mais il est quand même un produit de la science et semble apte à aider celle-ci à résoudre ses problèmes actuels, ceux-ci étant sous beaucoup de rapports

semblables à ceux de l'industrie moderne. La science et l'industrie ont tous deux à faire face à des opérations très compliquées, mais, pour des raisons tant pratiques qu'économiques, elles manquent de main-d'œuvre technique pour les accomplir. Toutes deux peuvent alléger leur tâche et étendre leurs activités en faisant appel à des dispositifs automatiques ou en divisant leurs travaux en séries d'opérations simples, à la portée de travailleurs qui n'auraient reçu qu'une formation rudimentaire.

On peut trouver actuellement dans presque tous les laboratoires bien outillés des exemples de la mécanisation d'opérations complexes: on pense aussitôt aux spectroscopes IR à engistrement automatique, aux balances automatiques, aux appareils de fractionnement pour la chromatographie et aux compteurs de particules automatiques. Ces dispositifs sont utiles à un double titre: d'abord ils font gagner un temps considérable qui peut être consacré à des travaux plus originaux. Ils permettent d'autre part de mener à bien des projets qui, tout en étant réalisables en théorie, exigeraient trop de labeur de la part de ceux qui s'en tiendraient aux méthodes usuelles. Par exemple, les progrès accomplis dans la chimie des protéines sont dus en grande partie à la chromatographie sur papier, qui a fourni une méthode supérieure à toutes celles dont on disposait précédemment pour la production en série d'analyses précises et complètes de mélanges d'acides aminés. Ou encore, c'est l'analyse rapide, au moyen de machines à calculer, de l'énorme masse des données recueillies, qui a permis les progrès rapides effectués récemment dans les études cristallographiques aux rayons X, et par conséquent les déterminations sensationnelles de la structure de quelques très grosses molécules. Dans le domaine important de la documentation on emploie encore des méthodes vieilles d'un demi-siècle, mais la mécanisation s'y installe peu à peu, et on a même mis à l'essai des machines à traduire électroniques.

L'utilisation de ces procédés gagne du terrain. On en trouvera un exemple intéressant dans un article sur les chambres à bulles publié dans le présent numéro. Des obstacles purement matériels auraient enlevé aux accélérateurs de particules actuels à très grande puissance toute leur valeur, car l'analyse par les méthodes ordinaires des données qu'ils fournissent en un seul jour prendrait une année entière à un spécialiste qui y consacrerait tout son temps. On a heureusement inventé un appareil qui suit au moyen d'un réticule chaque trajectoire de particule sur l'écran photographique. Les données obtenues sont ensuite analysées par un calculateur électronique qui détermine en une minute environ les principales caractéristiques d'une collision. Ce travail peut être confié à un opérateur peu entraîné et l'intervention d'un spécialiste est inutile sauf dans les cas d'événements sortant de l'ordinaire.

Il y a des savants, surtout ceux de la vieille école, que ces innovations inquiètent. Il est vrai qu'il ne faut y avoir recours sur une grande échelle qu'avec beaucoup de prudence, car l'utilisation d'appareils dont la fonction initiale est de nous fournir rapidement un volume accru de données positives pourrait donner l'impression qu'en science ce sont les faits qui importent et non les principes auxquels ils aboutissent. On dit aussi à juste titre que les appareils en question n'ont presque aucun pouvoir d'interprétation, et on ne voit pas comment ils pourraient enregistrer les effets exceptionnels, ou accidentels, dont sont issues la plupart des grandes découvertes. Un autre argument est qu'une trop grande dépendance sur les appareils automatiques pourrait faire perdre à l'expérimentateur cette dextérité manuelle qui lui est si utile. Ces craintes sont certes justifiées mais il serait illogique de supposer que les immenses progrès qu'ont réalisés les sciences ces dernières années et qui ont décuplé leur importance sociale, pourraient se maintenir sans changements profonds dans la technique. Il serait au contraire bien surprenant s'il n'y avait pas lieu de remanier les méthodes qui convenaient il y a un demi-siècle. D'autre part il ne faut pas exagérer l'importance des innovations en question, car elles sont destinées, non pas à réduire les activités des scientifiques, mais à leur permettre de consacrer une plus grande partie de leur temps à des travaux originaux qui exigent une formation et des connaissances sérieuses. Il est bon de signaler que l'automatisme n'affecte en rien la rigueur du raisonnement scientifique.

Si l'on admet ces arguments, il s'ensuit que l'introduction de l'automatisme en science dans un but précis, comme dans l'industrie, repose sur les raisons valables, bien que pour l'instant le mouvement ne se soit pas généralisé. Il est à remarquer néanmoins qu'il y a là un moyen efficace de parer à la pénurie actuelle de personnel scientifique et technique, et l'avis général est qu'au cours des cinquante années à venir l'hégémonie industrielle appartiendra aux nations qui auront les premiers compris et utilisé toutes les possibilités de l'automatisme.

La contraction musculaire

par H. E. HUXLEY

On a fait récemment de grands progrès dans la connaissance et la compréhension du mécanisme de la contraction musculaire. Ces progrès proviennent de deux sources principales — les études biophysiques et biochimiques de protéines musculaires purifiées ainsi que celles de systèmes musculaires «modèles» de types variés et, d'autre part, les recherches sur la structure moléculaire du muscle et les modifications qui s'y produisent au cours de la contraction. Les propriétés physiologiques du muscle commencent maintenant à trouver leur expression en termes de chimie et de structure.

Le muscle est essentiellement une machine hautement spécialisée, qui est formée de matériaux organiques, utilise de l'énergie stockée sous forme chimique et accomplit un travail mécanique. L'existence d'un mécanisme de ce type est indispensable au mouvement orienté de tout système biologique et sa rapidité, ainsi que son efficacité, influent d'une manière décisive sur les différents types de vie animale qui peuvent exister. Toutes les machines éveillent notre curiosité et celle-ci ne fait pas exception; la question qui vient d'abord à notre esprit est de savoir comment elle travaille. Cet article ne répondra pas à cette question, mais tentera de réunir quelques-uns des arguments et des preuves sur lesquels reposent nos idées actuelles sur la contraction musculaire. Ces idées, bien qu'utiles à beaucoup d'égards, présentent un très grand défaut: elles ne nous permettent pas de décider du principe et des propriétés fondamentales qui interviennent dans la contraction.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DU MUSCLE

Il existe deux types de muscles fondamentalement différents. Les muscles volontaires, sous contrôle de la conscience, agissent rapidement et ont un aspect strié au microscope; ils comprennent les muscles du squelette utilisés par les vertébrés pour les mouvements du corps et des membres. Les muscles involontaires, par exemple ceux qui produisent les mouvements intestinaux ou la dilatation des capillaires, ont généralement une action beaucoup plus lente et ne présentent pas l'aspect strié. On appelle habituellement les deux types «striés» et «lisses» respectivement. Le muscle cardiaque semble occuper une position intermédiaire car, bien que non volontaire, sa structure ressemble à celle du muscle strié. Les propriétés du muscle lisse ont été moins étudiées que celles du muscle strié et c'est de ce dernier que nous nous occuperons principalement.

Un muscle est formé d'un grand nombre de fibres dont le diamètre va de 0,01 à 0,1 mm et qui peuvent s'étendre sur toute la longueur du muscle. Ces fibres sont excitables par l'électricité et se contractent quand le nerf moteur leur transmet un influx électrique. Un seul influx produit une contraction simple, connue sous le nom de secousse musculaire, dont la durée est en général de l'ordre d'un dixième de seconde, bien qu'il existe des variations considérables entre les différents muscles. On peut maintenir une contraction plus longue, connue sous le nom de tétanos, au moyen d'une succession continue d'influx. Quand cessent les influx, la contraction cesse, elle aussi, et, si l'on a permis au muscle de se raccourcir, on peut alors l'étirer à nouveau sous l'action d'une très faible force. On dit que le muscle se relâche. Dans les conditions physiologiques normales les muscles ne se raccourcissent pas, en général, au-delà de 65% de leur longueur de repos ni ne s'allongent au-dessus de 140% de cette longueur. L'amplitude du phénomène est même souvent plus restreinte: de 85% à 120% constitue une valeur assez typique. La tension exercée par un muscle est maximale à la longueur de repos et décroît de part et d'autre de cette longueur.

Au cours d'un tétanos le muscle peut exercer une tension d'environ 4 à 5 kg/cm² de section transversale. La tension exercée est fonction de la rapidité du raccourcissement [1]. La tension maximale s'exerce quand le muscle ne peut pas se raccourcir du tout, c'est-à-dire au cours d'une contraction isométrique. Si P_0 est la tension maximale que le muscle peut exercer pour une longueur donnée, quand il se raccourcit avec une vitesse v la tension exercée sera P, si

$$(P + a)v = (P_0 - P)b,$$

a et b étant des constantes pour un muscle donné. Ceci est l'équation bien connue de Hill.

PRODUCTION DE CHALEUR

Quand on considère la chaleur produite par la contraction musculaire, la relation ci-dessus prend même une forme plus simple. La chaleur dégagée par un muscle au cours de la contraction peut se diviser pour la commodité en deux parties: la chaleur initiale qui se manifeste toujours que le muscle puisse ou non se raccourcir, et la chaleur de raccourcissement qui apparaît quand le muscle diminue de longueur [2]. Aucun dégagement de chaleur ne se produit quand le muscle se relâche et retourne à sa longueur de repos. La chaleur de raccourcissement est proportionnelle à la distance dont le muscle se raccourcit et indépendante de la force exercée pendant le raccourcissement. De plus, la chaleur émise pour un raccourcissement x est égale à ax où la constante a est la même que celle de l'équation force-vitesse. Ainsi, laissant de côté la chaleur initiale, le membre gauche de l'équation force-vitesse donnée ci-dessus représente la dépense totale d'énergie (chaleur + travail) faite par le muscle au cours de sa contraction. L'équation montre donc que cette dépense est proportionnelle à la différence entre la tension maximale et la tension instantanée.

LIBÉRATION D'ÉNERGIE

C'est un fait à remarquer que la quantité de chaleur produite, quand un muscle se raccourcit d'une longueur donnée, est indépendante du travail extérieur fourni par le muscle. De nombreux mécanismes auxquels on peut penser pour expliquer la contraction libèrent une quantité totale d'énergie constante et devraient donc nous faire prévoir une chaleur de raccourcissement croissante quand le travail extérieur diminue. Mais dans le muscle l'énergie totale libérée pour un raccourcissement donné varie avec la charge et reste toujours égale au travail extérieur fourni, augmenté d'une chaleur constante de raccourcissement. De plus, ceci est une propriété inhérente au matériel contractile et ne relève pas d'une disposition «de rétro-action» du système nerveux.

Le mécanisme mis en jeu dans la contraction apparaît donc clairement comme d'un type très spécial. Tout d'abord, la réaction chimique qui libère l'énergie de la contraction doit se trouver liée à un mouvement ou à une modification de forme dans la structure moléculaire du muscle. Deuxièmement, ce mouvement, ou changement de forme, doit rendre le muscle capable dans sa totalité de se raccourcir au moins du tiers de sa longueur au repos. Troisièmement, l'intensité de la réaction doit se trouver déterminée par le travail extérieur fourni par le muscle et non par la longueur dont il se raccourcit. Quatrièmement, le mécanisme doit donner la relation très simple de l'équation de Hill. Cinquièmement, après contraction le muscle doit être capable de revenir à sa longueur de repos sans aucun dégagement de chaleur supplémentaire. Ainsi, même indépendamment de son rapport avec la contraction musculaire, il est d'un intérêt intrinsèque considérable d'essayer de découvrir comment un tel mécanisme moléculaire peut travailler.

MOYENS D'ÉTUDE DU PROBLÈME

Les propriétés du muscle brièvement mises en évidence ci-dessus sont si frappantes et si clairement définies que l'on sent qu'elles doivent comporter une explication assez simple. Il y a deux manières assez différentes de chercher cette explication. La première consiste à essayer simplement de voir comment est construit un muscle. On peut étudier sa structure au microscope optique; les détails de la structure fine seront observés au microscope électronique, ou étudiés grâce aux techniques utilisant la diffraction des rayons X. Si l'on parvient à décrire les parties actives d'un muscle avec suffisamment de détails, cela nous rapprochera beaucoup de la compréhension de la façon dont joue le mécanisme.

La seconde voie d'accès est biochimique. On peut extraire et purifier beaucoup de constituants du muscle, et ensuite étudier leurs propriétés physiques et chimiques, soit en les prenant individuellement, soit en les combinant avec un ou plusieurs autres constituants. Ou peut établir des systèmes — par exemple, des fibres artificielles préparées à partir de protéines musculaires purifiées — qui jouissent de certaines propriétés du muscle vivant et dont on puisse étudier le comportement dans des conditions beaucoup plus strictement contrôlées.

MÉCANISME DE LA STIMULATION

La fibre musculaire est la plus petite unité qui puisse accomplir une contraction physiologique normale. Chaque fibre est entourée par une fine membrane qui est électriquement polarisée. A l'état de repos, il existe une différence de potentiel d'environ 0,1 V entre ses deux faces, la face interne étant négative. Quand on stimule le muscle par l'intermédiaire de son nerf moteur et de sa plaque motrice, une onde de dépolarisation, le potentiel d'action, parcourt la membrane musculaire, annulant la différence de potentiel et provoquant même un

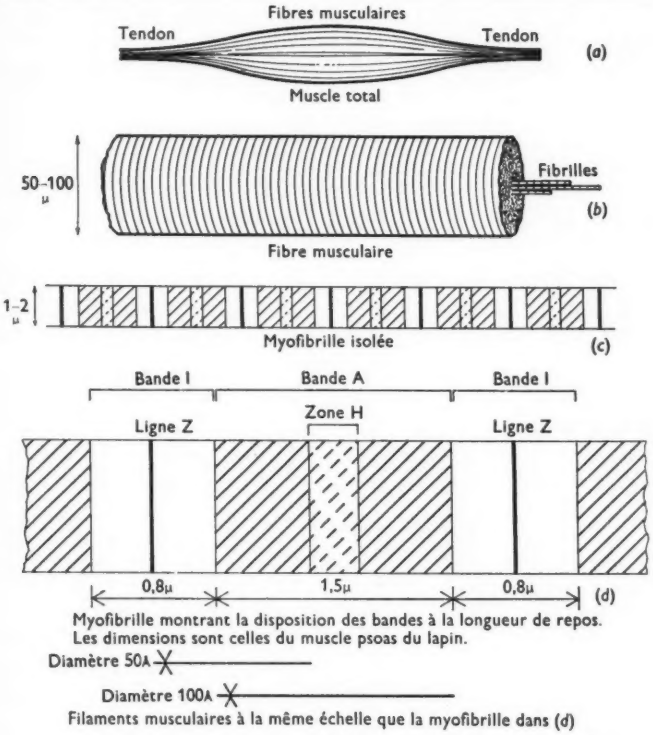


FIGURE 1 – *Structure du muscle à différents niveaux d'organisation.*

renversement du signe. Presque immédiatement le muscle se contracte. On sait que la dépolarisation de la membrane altère sa perméabilité à différents ions et il est naturel de chercher à savoir si le passage d'un ion spécifique à travers la membrane externe ne pourrait pas déclencher la contraction. Pourtant une telle explication ne peut se soutenir, au moins sous cette forme simple, car la fibre musculaire devient pleinement active sur toute sa section transversale dans un temps beaucoup plus court que celui que prendraient de tels ions pour diffuser vers le centre de la fibre ou à partir de celui-ci [3]. On a suggéré récemment [4] que le signal de la contraction pouvait se transmettre à l'intérieur de la fibre à la vitesse requise sous forme d'une onde de dépolarisation se propageant sur une membrane transversale interne. Un système de membranes transversales de ce type, situées à de courts intervalles le long de la fibre et libérant chacune un activateur à l'intérieur de cette fibre au moment de la dépolarisation, pourrait fournir la vitesse nécessaire à l'activation. Il existe de fortes raisons de penser qu'un tel mécanisme existe en fait dans le muscle strié [4].

LA STRUCTURE CONTRACTILE

Le matériel contractile se trouve à l'intérieur des fibres musculaires sous forme de minces fibrilles longitudinales, appelées myofibrilles, d'environ 1 micron de diamètre, serrées les unes contre les autres suivant la largeur de la fibre et s'étendant sur toute sa longueur. Si l'on brise mécaniquement les fibres, par exemple dans un broyeur Waring, on libère les fibrilles. Ces myofibrilles isolées fournissent un très important matériel expérimental. En effet, bien qu'on ne puisse les stimuler électriquement, on peut les faire se contracter par des traitements biochimiques appropriés; elles semblent contenir l'appareil contractile essentiel du muscle sous une forme encore hautement organisée, mais débarrassée de facteurs compliqués et incontrôlables que l'on trouve dans le muscle entier vivant.

Les fibres du muscle volontaire sont coupées par un système de bandes régulièrement répétées; ces striations transversales ont une périodicité de l'ordre de deux ou trois microns au repos. Cette période semble constante pour un type donné de muscle pris à la longueur de repos, mais varie quelque peu d'un type de muscle à l'autre; certains muscles, par exemple les muscles des pattes de certaines araignées, ont une striation exceptionnellement longue. Cette striation est une propriété des myofibrilles, disposées dans la fibre de manière à présenter leurs stries en correspondance. La figure 1 montre schématiquement cette disposition et la figure 3(*a*) une myofibrille isolée photographiée au contraste de phase. Le caractère principal est la succession de bandes alternativement sombres et claires qui correspondent à des régions denses et moins denses de la myofibrille. Les bandes denses sont biréfringentes et sont connues sous le nom de bandes A (anisotropes); les bandes moins denses sont non biréfringentes et désignées sous le nom de bandes I (isotropes). Les bandes I se trouvent séparées en deux par une ligne dense, appelée ligne Z ou membrane Z. Les membranes Z semblent continues à travers toute la largeur de la fibre et paraissent maintenir les fibrilles en correspondance; il est évident qu'elles pourraient constituer le chemin le long duquel le signal de la contraction se transmet à l'intérieur de la fibre [4].

On a décrit ce schéma avec quelque détail car son intérêt n'est pas uniquement morphologique, puisqu'il est l'expression visible de la structure moléculaire hautement organisée responsable de la contraction.

STRUCTURE VISIBLE AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE

Quand on examine le muscle on trouve les myofibrilles elles-mêmes constituées de filaments longitudinaux plus petits dont le diamètre est de l'ordre de 100Å. Ces filaments restent droits quand le muscle se contracte. Ils forment un faisceau continu occupant toute la largeur des myofibrilles, étant espacés de quelques centaines d'ångströms. *In vivo*, l'espace entre ces filaments est occupé par une solution de sels et des protéines solubles. La disposition des filaments est tout à fait cristalline dans sa régularité et le muscle vivant réfléchit très fortement les rayons X sous des angles appropriés [5].

Depuis ces dernières années, les progrès techniques permettent de faire des coupes de muscles et d'autres tissus biologiques suffisamment minces pour l'examen au microscope électronique. Ceci a largement étendu l'usage de cet instrument et, à cause de l'extrême finesse des coupes (seulement une ou deux centaines d'ångströms) a rendu possible une résolution de l'ordre de 30Å sur matériel biologique. L'examen de micrographies électroniques de coupes transversales très minces de muscle révèlent certains traits remarquables de la structure [6]. Les coupes transversales dans les parties les plus denses de la bande A, c'est-à-dire les régions situées de part et d'autre de la zone H, montrent la présence de deux types différents de filaments (figure 4(*a–e*)). Il existe d'abord un faisceau hexagonal de filaments «primaires» d'environ 100Å de diamètre et espacés d'environ 200 à 300Å. L'espacement mesuré sur le muscle vivant par la diffraction des rayons X est de 450Å et les valeurs plus basses observées ici sont probablement dues à un retrait du matériel des coupes au cours de la préparation. Entre les filaments primaires on peut voir un second faisceau de filaments plus fins, d'environ 40 à 50Å de diamètre; chaque filament secondaire se trouve placé symétriquement entre trois filaments primaires, si bien que chaque filament primaire est entouré de six filaments secondaires qui le séparent des six filaments primaires les plus proches. La figure 2 donne un schéma de cette disposition.

Des coupes à travers la région centrale de la bande A, c'est-à-dire la zone H, montrent seule-

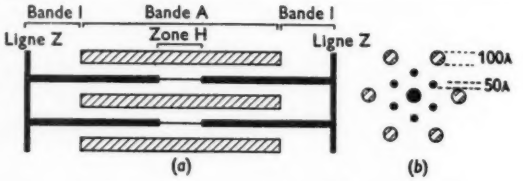


FIGURE 2 – *Diagramme de la disposition des filaments dans le muscle strié;* a) *coupe longitudinale,* b) *transversale.*

ment le faisceau hexagonal de filaments primaires (figure 4(*f*)) et les filaments secondaires dans cette région doivent être si fins qu'ils échappent à la détection. Les coupes à travers la bande I montrent seulement de fins filaments de diamètre environ 50Å et le faisceau hexagonal de filaments primaires est absent de cette bande comme le montrent les coupes longitudinales (figure 3(*b*)).

La conclusion de ces observations est très nette. Les fibrilles sont formées de deux faisceaux de filaments longitudinaux qui s'interpénètrent (figure 2). Les filaments épais n'existent que dans la bande A et produisent la forte densité et la biréfringence de cette bande. Les filaments fins s'étendent de chaque côté de la ligne Z, au travers de la bande I et jusque dans la bande A et s'interrompent ou deviennent plus minces au niveau de la zone H. La zone la moins dense est celle où les filaments fins sont seuls présents (bande I), car bien que deux fois plus nombreux que les filaments épais la section transversale de chacun d'eux est environ quatre fois plus petite. La zone la plus dense de la myofibrille se trouve là où il y a interpénétration entre les deux faisceaux de filaments, c'est-à-dire, dans la région de la bande A qui s'étend de chaque côté de la bande H. Vient ensuite, par ordre de densité, la partie de la zone H où il y a seulement des filaments épais.

MODIFICATIONS DE LA DISPOSITION DES BANDES PENDANT LA CONTRACTION ET L'ÉTIREMENT

Les bandes A et I ont des longueurs de l'ordre du micron, si bien que, dans le domaine des contractions physiologiques, les modifications de longueur de bande ne pourraient s'exprimer qu'en fractions de micron. De si petites modifications sont difficiles à mesurer, particulièrement quand elles s'effectuent très rapidement, et les mesures sont sujettes à des artefacts optiques. En fixant le muscle avant examen au microscope optique, on ne résoud pas réellement le problème car l'opération de fixation peut elle-même introduire des

modifications de la longueur des bandes. Ce n'est que ces dernières années, avec l'introduction des microscopes à contraste de phase et interférentiels que l'on a pu effectuer des mesures dignes de foi [7, 8]. Les résultats sont remarquablement simples. Considérons par exemple le muscle squelettique du lapin ou de la grenouille. A la longueur de repos la distance entre les lignes Z successives qui définit la période de répétition des stries transversales est de 2,3 microns; la longueur de la bande A est de 1,5 microns et celle de la bande I de 0,8 microns. Quand le muscle se contracte, la bande A conserve une longueur constante et la bande I diminue de longueur jusqu'à disparaître pour une longueur du muscle d'environ 65% de la longueur au repos. Ceci représente la limite normale de la contraction physiologique et si le muscle se raccourcit davantage il se produit des bandes denses de contraction aux endroits où deux bandes A adjacentes sont venues au contact sur la ligne Z. Les figures 6 et 9 illustrent ces modifications schématiquement et comme elles se produisent réellement dans une fibrille isolée observée au contraste de phase.

Si l'on étire un muscle relâché, les bandes A restent d'une longueur constante et ce sont les bandes I qui s'allongent. Au cours d'une contraction effectuée à partir d'une position étirée, le même processus se produit en sens inverse. Dans une contraction isométrique, où le muscle exerce une force mais ne peut se raccourcir, ni les bandes A ni les bandes I ne changent de longueur. Il apparaît que, dans toutes les circonstances, la disposition des bandes est simplement déterminée par la longueur du muscle et qu'elle est la même, que le muscle soit actif ou non. De plus, on observe les mêmes modifications de la disposition des bandes dans les expériences faites sur des fibres vivantes, se contractant dans les conditions physiologiques normales, et sur des fibrilles isolées dont on provoque la contraction par des moyens biochimiques.

Une propriété supplémentaire, très caractéristique, des modifications de la disposition des bandes est à signaler. On se rappelle que la région centrale de la bande A, la zone H, est un peu moins dense que les régions situées de part et d'autre. Quand le muscle augmente de longueur la zone H grandit de la même quantité, bien que la longueur totale de la bande A reste constante. Ainsi la distance de la ligne Z à la limite de la zone H reste constante (figure 8). La micrographie électronique reproduite dans la figure 7 montre l'aspect d'une fibrille étirée avec sa très longue zone H. Durant le raccourcissement, la zone H diminue de longueur, jusqu'à disparaître pour une longueur d'environ 85% de la longueur au repos; elle est ensuite remplacée par une ligne sombre si le raccourcissement se poursuit.

Ces observations ont une explication très simple, qui devient particulièrement évidente quand on garde présentes à l'esprit les observations faites au microscope électronique. C'est que les deux faisceaux de filaments dont les longueurs déterminent l'épaisseur de la bande A et la distance de la ligne Z à la limite de la zone H, gardent toujours une longueur constante et que les changements de longueur du muscle résultent seulement du glissement des deux faisceaux l'un dans l'autre [7, 8]. Si le muscle se contracte trop, les filaments d'un des faisceaux ou des deux devront se froisser à leurs extrémités, mais dans toute une gamme importante de longueur, le phénomène de glissement se produit seul. Les résultats fournis par l'étude de la diffraction des rayons X apportent un soutien supplémentaire à cette hypothèse.

DONNÉES FOURNIES PAR LA DIFFRACTION DES RAYONS X

Les filaments vus sur les micrographies électroniques montrent souvent une périodicité longitudinale d'environ 400Å et l'on a démontré l'existence d'une période axiale similaire (415Å) dans les diagrammes de diffraction faits à angle faible sur des muscles vivants [5]. Les réflexions des rayons X sont très nettes et montrent que la périodicité doit se maintenir avec une précision presque atomique. Quand on étire un muscle vivant la période trouvée aux rayons X n'augmente pas et les diagrammes obtenus à partir de muscles contractés artificiellement suggèrent que la période y reste aussi constante. On ne sait pas encore si la période trouvée aux rayons X provient de la structure interne d'un seul type de filaments ou des deux. Quoi qu'il en soit, l'étude aux rayons X montre que la structure qui fournit cette périodicité axiale de 415Å ne change pas de longueur quand le muscle modifie la sienne. Ce résultat est parfaitement d'accord avec le schéma proposé de filaments glissant les uns sur les autres.

Aucune modification caractéristique en rapport avec la contraction ne s'observe non plus sur les diagrammes aux rayons X faits avec une grande ouverture angulaire [9]. Ceci nous montre encore que la majeure partie de la structure interne des

filaments conserve une configuration atomique constante au cours de la contraction.

CONSTITUANTS PROTÉIQUES DU MUSCLE

Les muscles contiennent environ 20% de protéines et 80% de solution saline diluée. Les deux tiers environ des protéines se présentent sous forme fibreuse et constituent la structure contractile du muscle. D'autres protéines sont des enzymes qui facilitent les réactions de transformation du glycogène, composé riche en énergie charrié par le sang, en un autre composé directement utilisable comme source d'énergie par la machine contractile. Ces réactions métaboliques synthétisent l'adénosine triphosphate (ATP) et l'on sait depuis longtemps que l'hydrolyse de ce composé en adénosine diphosphate (ADP) est une réaction étroitement liée au processus contractile. Bien que l'on puisse démontrer l'existence de cette réaction dans les contractions d'une durée appréciable les tentatives pour démontrer une décomposition de l'ATP lors d'une secousse isolée n'ont pas été couronnées de succès [10, 11]. Il reste donc possible qu'il existe un autre composé, lui-même synthétisé à partir de l'ATP, pouvant fournir la source d'énergie immédiate ou même que le mécanisme contractile soit par lui-même capable d'accomplir une secousse, sans apport externe d'énergie.

Les deux grandes découvertes qui ont simplifié la biochimie du muscle et permis d'orienter la pensée et l'expérience sur le fond même de la question de la contractilité, concernent les protéines de la structure musculaire. Deux de celles-ci, l'actine et la myosine, ont une importance particulière et forment ensemble environ la moitié des protéines totales du muscle. On sait depuis longtemps que la myosine est une protéine fibreuse typique et l'on pensait généralement qu'une modification de la configuration de la molécule de myosine était le facteur responsable de la contraction musculaire. La découverte [12] que cette myosine est l'enzyme qui catalyse le passage de l'ATP à l'ADP fit donc une sensation considérable.

Une découverte peut-être encore plus remarquée fut celle de la possibilité d'extraire du muscle, des fibres artificielles formées d'un mélange d'actine et de myosine, et qui se contractent quand on les place dans une solution appropriée contenant de l'ATP [13, 14]. Ces découvertes ont montré que le mécanisme de base de la contractilité se trouve tout entier contenu dans le système actine-myosine-ATP.

PROPRIÉTÉS DE LA MYOSINE ET DE L'ACTINE

On donne souvent pour la myosine un poids moléculaire de 800 000 [15] mais on le ramène maintenant à la moitié de cette valeur [16]. La molécule est longue et mince; la dispersion de la lumière et d'autres mesures donnent une longueur de l'ordre de 1 500 à 2 000Å avec un diamètre d'environ 20Å [15, 17]. L'actine a un poids moléculaire d'environ 70 000 [15]; la forme de la molécule est incertaine. Elle peut en effet exister en solution sous deux aspects différents: une des formes, connue sous le nom d'actine globulaire (actine G) semble constituée soit de simples molécules soit de dimères; si l'on ajoute du sel à des solutions d'actine G, il se forme de l'actine fibreuse ou actine F. On peut donc penser que l'actine est présente dans le muscle sous forme d'actine F. Les solutions d'actine F ont une viscosité élevée et anormale, montrent une forte biréfringence d'écoulement, développent spontanément une biréfringence au repos et jouissent de beaucoup d'autres propriétés que l'on s'attendrait à trouver chez de longs polymères d'actine G. Elles possèdent deux caractéristiques très intéressantes. Si l'on marque l'actine avec un colorant fluorescent, les périodes de rotation des unités d'actine G dans l'actine F peuvent se calculer par des mesures de polarisation de la lumière fluorescente. Ces mesures amènent à la conclusion que les unités d'actine G dans l'actine fibreuse ont une liberté de rotation au moins autour d'un axe [18]. On a aussi trouvé que l'actine globulaire possède de l'ATP lié, et que cet ATP se transforme en ADP quand l'actine G se polymérise pour former l'actine F [19].

Quand on fait un mélange d'actine et de myosine la viscosité du mélange est considérablement plus forte que la somme des viscosités des constituants. Si l'on centrifuge le mélange à grande vitesse, presque toutes les protéines se retrouvent dans le culot de sédimentation, alors que traitée de la même manière la myosine seule reste en grande partie dans le surnageant [20]. Il est clair qu'une sorte de complexe peut se former entre actine et myosine; ce complexe a reçu le nom d'actomyosine. Si l'on ajoute de l'ATP à des solutions d'actomyosine dans du KCl 0,6 M, il se produit une brusque chute de la viscosité et l'on peut récupérer la myosine seule dans le surnageant après une centrifugation qui entraîne l'actomyosine et l'actine F [20]. Il semble donc qu'à cette concentration de sels, l'ATP dissocie le complexe actomyosine en actine et myosine; l'ATP est lui-même attaqué par la myosine et, quand tout

l'ATP a été hydrolysé de cette manière, le complexe actomyosine se reforme. A des concentrations salines plus basses (par exemple 0,1 M) l'ATP provoque la précipitation de l'actomyosine de la solution. Et, quand cette actomyosine est orientée en fils, l'ATP en provoque la contraction.

Les molécules d'actine marquées, comme plus haut, avec un colorant fluorescent peuvent encore former de l'actomyosine; des mesures de dépolarisation de fluorescence montrent que les unités d'actine, dans l'actomyosine, se comportent comme des monomères ayant une liberté de rotation autour d'un axe au moins; quand on dissocie l'actomyosine par l'ATP, immédiatement l'actine se comporte comme si elle était composée de dimères [21]. Ces relations sont attachantes et plutôt déconcertantes et l'on n'a encore proposé aucun schéma qui puisse les expliquer toutes.

SYSTÈMES MODÈLES

On peut aussi étudier les interactions entre actine, myosine et ATP d'une manière très profitable sur des systèmes modèles dont la complexité se trouve à mi-chemin entre la solution de protéine purifiée et la fibre vivante. On a déjà mentionné le premier de ces systèmes: les fibres d'actomyosine. Le second est ce que l'on appelle le modèle de fibre extraite au glycérol. Les fibres musculaires gardées au froid dans du glycérol à 50% pendant quelques jours ou quelques semaines, bien que n'étant plus excitables électriquement, se contractent quand on les place dans des solutions appropriées contenant de l'ATP [22]. On a trouvé que cette contraction imite à beaucoup d'égards celle de la fibre vivante, bien qu'elle se fasse plus lentement. La tension maximale exercée est approximativement la même.

Les fibres glycérinées sont normalement inextensibles et ressemblent aux muscles à l'état de rigidité, car elles ont perdu l'ATP que contient le muscle frais vivant. Si, après une contraction à l'ATP d'une fibre de ce modèle on la débarrasse de l'ATP par lavage, elle se fixe à la longueur raccourcie. Si, cependant, on inhibe la déphosphorylation de l'ATP soit par un poison d'enzyme, par exemple le salyrgan, soit par un facteur [23] que l'on peut extraire du muscle frais, alors non seulement la contraction est abolie, mais on peut encore étendre facilement la fibre à nouveau à sa longueur originelle. Dans ces conditions on dit que l'ATP agit comme plastifiant.

Certains phosphates inorganiques, par exemple le pyrophosphate de sodium [24], ont aussi un effet plastifiant sur la fibre glycérinée; ces composés ne sont pas déphosphorylés par la myosine, mais tous ont la propriété d'abaisser la viscosité d'une solution d'actomyosine et peuvent donc probablement, comme l'ATP, dissocier le complexe d'actomyosine.

On peut comparer ces observations avec le comportement des fibres musculaires vivantes. Celles-ci contiennent de l'ATP, mais au repos l'activité enzymatique de la myosine se trouve inhibée d'une manière quelconque et l'hydrolyse de l'ATP est très lente; les fibres sont très flexibles et on peut facilement les étirer. Au cours de la contraction le muscle devient rigide mais retrouve sa plasticité quand elle cesse. Si le muscle passe à l'état de rigidité cadavérique, état lié avec la perte d'ATP, les fibres deviennent incapables de se contracter, rigides et inextensibles.

Il semble donc que l'ATP joue un double rôle dans le muscle. Quand la déphosphorylation ne peut se faire, la présence d'ATP maintient le muscle plastique et extensible; quand la déphosphorylation peut se faire, la présence d'ATP provoque la contraction.

CONCLUSIONS BIOCHIMIQUES

Nous pouvons résumer les résultats biochimiques comme suit:

1. La structure contractile est formée en grande partie de deux protéines, l'actine et la myosine.
2. Une sorte de combinaison peut se produire entre actine et myosine.
3. Cette combinaison est modifiée par la présence d'ATP.
4. La myosine est une enzyme pour la déphosphorylation de l'ATP.
5. La déphosphorylation de l'ATP est étroitement liée à la libération d'énergie utilisée pour la contraction.
6. La présence d'ATP sans déphosphorylation rend la structure contractile extensible.
7. D'autres substances, qui, comme l'ATP, dissocient l'actomyosine, rendent aussi la structure contractile extensible.
8. En l'absence d'ATP ou d'autres plastifiants la structure contractile devient rigide et inextensible.

COMPOSITION PROTÉIQUE DES FILAMENTS

On peut dissoudre la myosine du muscle entier ou des myofibrilles isolées par des procédés qui retirent peu, ou pas du tout, d'actine [25]. Les observations microscopiques montrent que le retrait de la myosine s'accompagne de l'extraction du matériel dense des bandes A, c'est-à-dire, de la

substance appelée substance A [26, 27]. Ceci est illustré dans la figure 5 qui montre une myofibrille isolée avant et après extraction de la myosine. Il reste un «fantôme» de fibrille formé du matériel situé entre les lignes Z et la limite de ce qui était auparavant la zone H. Les zones H ont maintenant une densité très faible, mais la structure de la fibrille est encore continue à travers celles-ci. Ces fantômes de fibrilles ne se contractent pas dans des solutions contenant de l'ATP. Au microscope électronique, on peut voir que les faisceaux de filaments épais qui caractérisaient les bandes A du muscle normal n'existent plus. De plus, des mesures faites au microscope interférentiel [28] montrent que la quantité de substance A présente dans les fibrilles intactes et enlevée par extraction de la myosine est exactement égale à la quantité de myosine contenue dans les fibrilles d'après l'analyse biochimique. On peut donc conclure que les filaments épais, visibles au microscope électronique dans les bandes A du muscle, sont principalement constitués de myosine.

Après avoir retiré la myosine du muscle, on peut en extraire l'actine par un autre procédé. Quand on traite par ce procédé les fantômes de fibrilles résultant de l'extraction de la myosine, la plus grande partie du matériel résiduel, situé entre la ligne Z et la limite de la zone H, disparaît (figure 5). On se souviendra que, d'après les données de la microscopie électronique, ce matériel est constitué de fins filaments qui forment les faisceaux hexagonaux secondaires qui se glissent entre les filaments épais, dans la bande A. Ainsi, on peut conclure que ces filaments secondaires contiennent l'actine.

On arrive donc au concept très simple que les deux principales protéines contractiles du muscle, l'actine et la myosine, constituent des filaments séparés; et que l'interaction des filaments d'actine et de myosine avec l'ATP détermine leur glissement les uns entre les autres (figure 10). C'est à la lumière de ce schéma que l'on doit chercher une relation entre les observations biochimiques et le comportement physiologique du muscle.

CORRÉLATION ENTRE STRUCTURE, BIOCHIMIE ET PHYSIOLOGIE

La construction du muscle strié suivant ce schéma paraît offrir deux avantages du point de vue mécanique. Ils dérivent des deux qualités fondamentales de la structure — la nature discontinue des filaments d'actine comme de myosine et le fait que les filaments de chacun des types soient disposés en accord avec ceux de l'autre. Ceci permet d'abord un raccourcissement considérable, sans qu'aucun des deux types de filaments ait à se replier d'une manière quelconque. Ensuite, les filaments d'un faisceau donné ne peuvent se mouvoir les uns par rapport aux autres et ainsi les pertes par frottement interne se trouvent réduites au minimum. Cette disposition se montre précise, efficace et bien adaptée à fournir des contractions rapides [29].

Le comportement du muscle, quand on l'étire, nous fournit un bon point de départ pour montrer comment les différents types de connaissances sur le muscle commencent à s'adapter les uns aux autres. Au cours de l'étirement, nous avons vu que les filaments d'actine sortent du faisceau des filaments de myosine. Si des liaisons transversales existaient entre les filaments d'actine et de myosine et si les filaments étaient inextensibles, le muscle lui-même serait inextensible. De telles liaisons transversales correspondraient à la combinaison qui peut se produire entre actine et myosine en solution. On pense que l'ATP dissocie cette combinaison et l'on doit donc s'attendre à ce qu'il rompe les liaisons entre filaments d'actine et de myosine. Ainsi s'explique d'une manière très simple l'observation que le muscle et les modèles de muscles ne sont extensibles qu'en présence d'ATP ou d'autres substances pouvant dissocier le complexe actomyosine.

MÉCANISMES DE LA CONTRACTION

On peut maintenant résumer comme suit les données obtenues sur la contraction: à l'état de repos, les deux faisceaux de filaments ne sont pas liés l'un à l'autre par suite de la présence de l'ATP et de l'absence de son hydrolyse. Quand on stimule le muscle, la libération d'un activateur provoque le début de la décomposition enzymatique de l'ATP. Il se produit une interaction entre myosine, actine et ATP et il en résulte que le faisceau de filaments d'actine pénètre plus avant dans le faisceau de filaments de myosine, ce qui donne le raccourcissement du muscle et les modifications observées de la répartition des bandes. Quand cesse la décomposition de l'ATP, son interaction avec la myosine et l'actine ne poursuit pas la contraction mais brise simplement les liaisons entre les deux types de filaments; le muscle peut alors s'étirer à nouveau. Dans le cas d'une fibre glycérinée le phénomène est similaire, sauf que la décomposition de l'ATP et la contraction commencent aussitôt que l'on fournit de l'ATP à la fibre et cessent seulement après lavage de la fibre, en laissant celle-ci bloquée à la

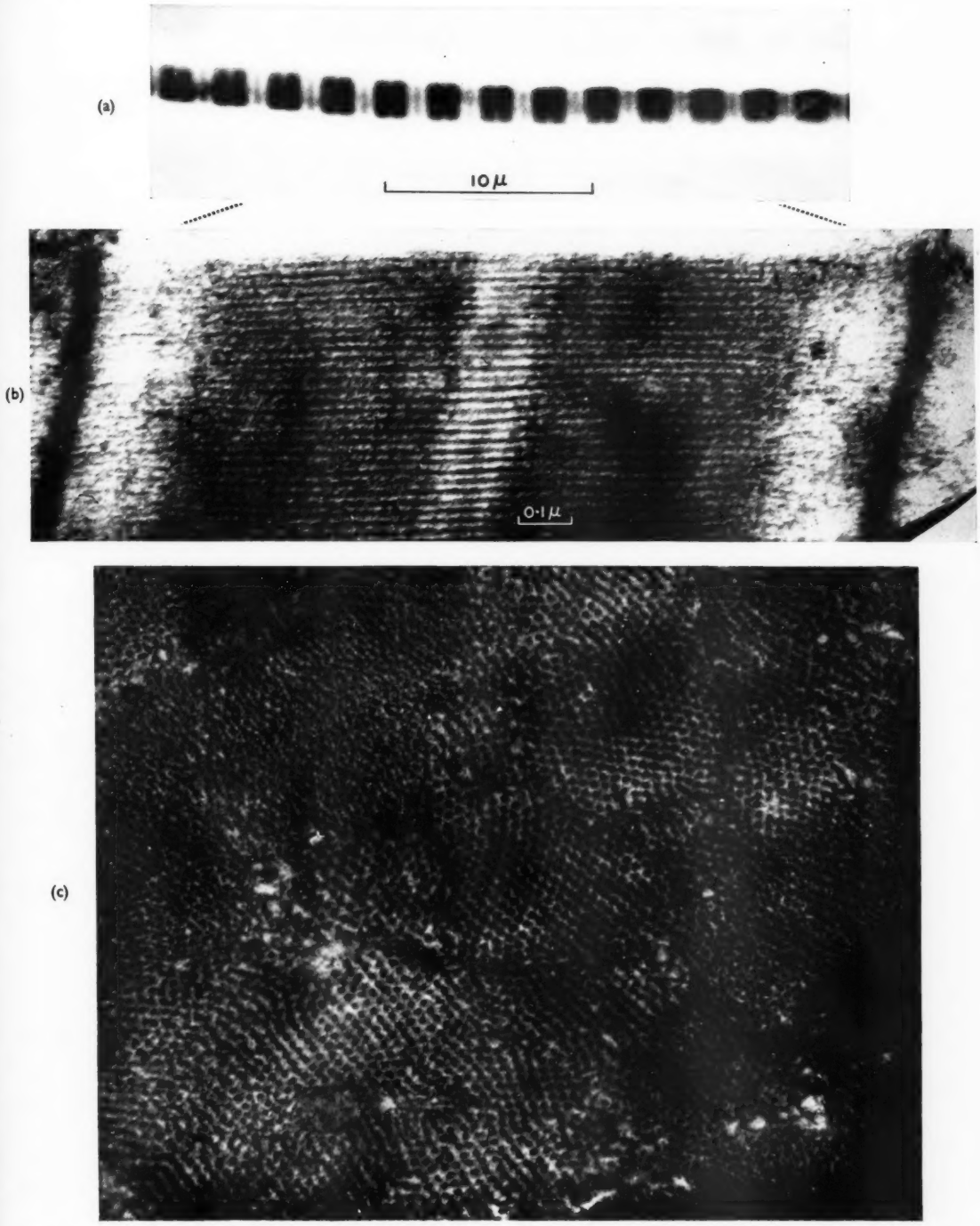


FIGURE 3 – a) *Myofibrille d'un muscle psoas de lapin, photographiée au contraste de phase. Noter les bandes A plus denses et les bandes I plus claires traversées par les lignes Z.* b) *La même, vue au microscope électronique (coupe longitudinale).* c) *Coupe transversale de muscle montrant le réseau continu de filaments; au centre de la figure la coupe passe à travers une zone H et un seul faisceau y est visible; de part et d'autre, on peut voir le réseau composé présent dans le reste de la bande A.*

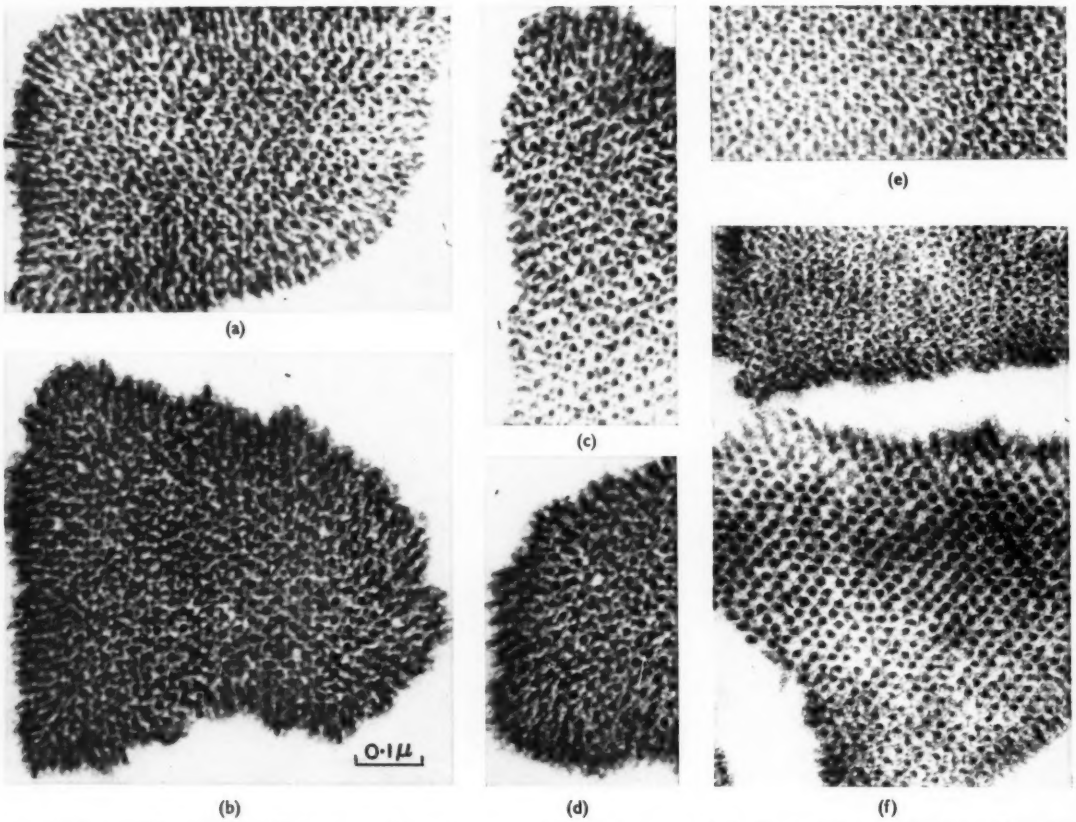


FIGURE 4 – *Micrographies électroniques de coupes transversales de muscle psoas de lapin (coloré à l'acide osmique et à l'acide phosphotungstique).* a–e) *coupes montrant le double faisceau hexagonal de filaments dans la bande A.* f) *coupes montrant le faisceau hexagonal simple dans la zone H.*

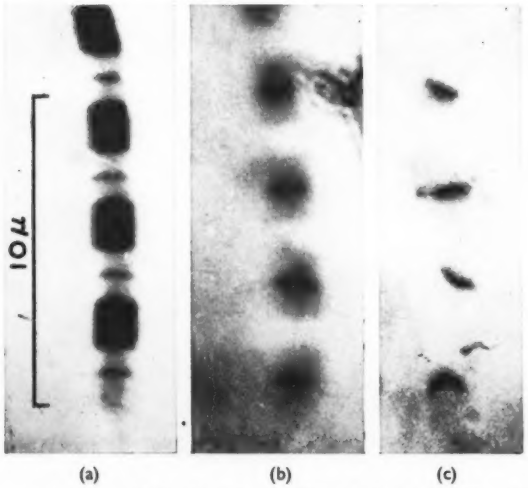


FIGURE 5 – *Extraction des protéines de la myofibrille.* a) *avant extraction;* b) *après extraction de la myosine; noter l'absence de substance A;* c) *après extraction de l'actine; seules les lignes Z et un squelette résiduel subsistent.*

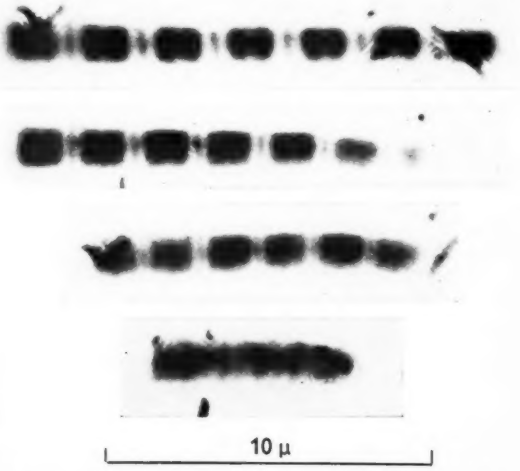


FIGURE 6 – *Myofibrille du muscle psoas du lapin, photographiée au contraste de phase à des stades successifs de la contraction provoquée par l'ATP; noter le raccourcissement des bandes I et la disparition des zones H.*

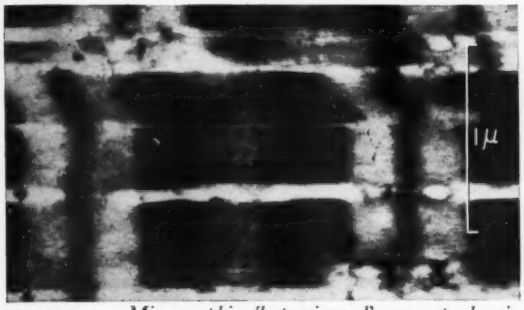


FIGURE 7 – *Micrographie électronique d'une coupe longitudinale de muscle étiré; noter l'allongement des zones H.*

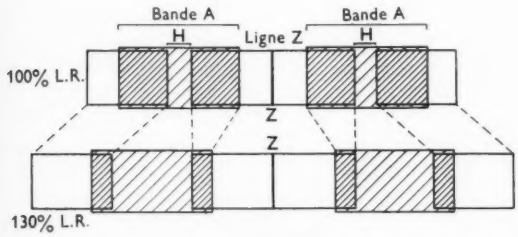


FIGURE 8 – *Schéma des modifications de la disposition des bandes au cours de l'étirement du muscle; la distance de la ligne Z à la limite de la zone H reste constante. L.R. = Longueur de repos.*

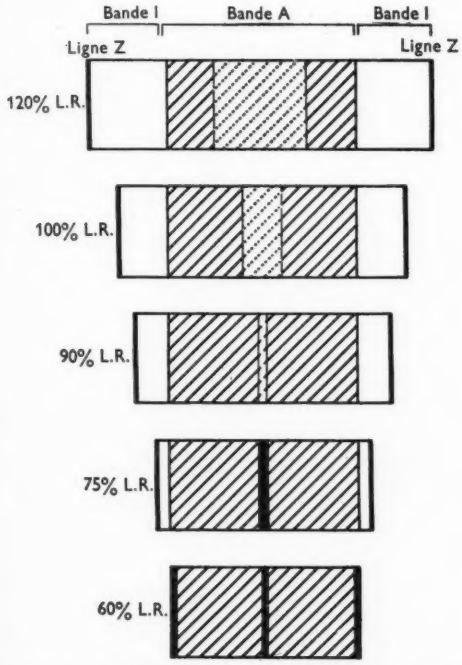


FIGURE 9 – *Diagramme des modifications de la disposition des bandes au cours de la contraction.*

longueur raccourcie. Le caractère essentiel est que les filaments d'actine se mettent à glisser entre les filaments de myosine sous l'action d'une réaction dans laquelle intervient la déphosphorylation de l'ATP, mais dont les détails restent inconnus.

Chaque filament contient plusieurs centaines de molécules d'actine ou de myosine. L'étude par diffraction des rayons X montre que, au moins dans l'un des types de filaments et peut-être dans les deux, les molécules ont une disposition régulièrement répétée. Dans la région où les deux faisceaux de filaments se pénètrent, il se produit vraisemblablement des interactions myosine-actine en de nombreux points où les molécules d'actine et de myosine se trouvent face à face. Ces interactions provoquent le glissement des deux faisceaux l'un dans l'autre. A chaque fois, les filaments glissent l'un à côté de l'autre d'une distance égale à leur périodicité axiale, puis ils retrouvent la même disposition spatiale des interactions réciproques. On peut donc s'attendre à ce que le système fonctionne palier par palier, chaque contraction complète étant formée de la répétition de nombreuses petites contractions identiques au niveau des liaisons entre molécules d'actine et de myosine.

Un mécanisme possible est celui de liaisons transversales orientées obliquement des molécules de myosine d'un filament aux molécules d'actine de l'autre. Le raccourcissement de cette liaison tirerait le filament d'actine sur une courte longueur. La liaison pourrait alors se détacher de la molécule d'actine (grâce, disons, à l'arrivée d'une molécule d'ATP) s'étendre à nouveau et aller s'attacher sur le filament d'actine un peu plus loin, le phénomène se répétant. On a aussi proposé un mécanisme plus compliqué comportant des altérations répétées de la longueur des filaments d'actine.

Quels que soient les détails du mécanisme, les propriétés fondamentales sont les mêmes: à l'intérieur du cycle majeur comportant contraction et relâchement du muscle on trouve de nombreux cycles mineurs à l'échelle moléculaire. Ainsi on ne peut considérer simplement le retour du muscle à sa longueur de repos comme un étirement du matériel contractile. Les arguments invoqués pour savoir si le muscle pris dans sa totalité se relâche activement ou passivement, bien que très importants à beaucoup d'autres égards, n'ont pas de rapport direct avec la question de savoir si le matériel contractile s'étend activement ou passivement, à l'échelle moléculaire. Une autre caractéristique de ce type de mécanisme est que chaque enzyme, c'est-à-dire chaque molécule de myosine, peut prendre part à la réaction un grand nombre

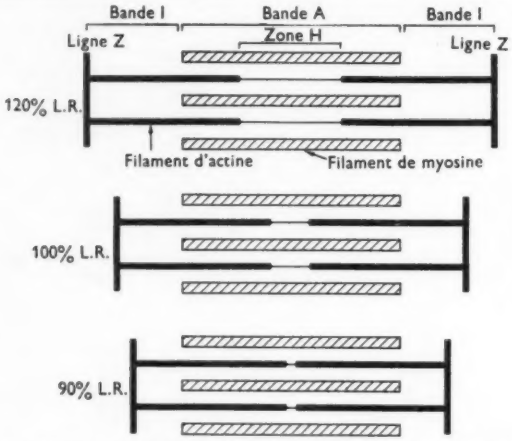


FIGURE 10 – *Diagramme montrant le comportement des filaments d'actine et de myosine au cours des changements de longueur du muscle.*

de fois au cours de chaque cycle de contraction. Le travail total fourni par cycle sera donc beaucoup plus grand que dans un système où chaque liaison ne pourrait se raccourcir qu'une seule fois par cycle, comme ce serait, par exemple, le cas de raccourcissements de nombreuses liaisons s'additionnant en série.

Un système de liaisons agissant en parallèle et devant se rompre et se reformer chaque fois que se produit un petit raccourcissement, possède une autre propriété intéressante. Si un temps défini est nécessaire à la formation de chaque liaison, le nombre de liaisons existant à un moment donné, et donc la tension totale exercée, sera fonction de la vitesse de raccourcissement. Si l'on empêche le système de se raccourcir, il disposera alors du temps nécessaire à la formation du nombre maximal de liaisons et la tension sera maximale. En faisant un petit nombre d'hypothèses, on peut montrer que dans un tel système la libération d'énergie varie avec la charge d'une manière qui imite étroitement le comportement simple et frappant du muscle lui-même [30].

Les observations nous conduisent donc à un mécanisme dont le comportement général s'adapte très bien avec les propriétés physiologiques du muscle. La nature profonde de ce mécanisme reste, cependant, encore inconnue. Nous avons encore besoin de micrographies électroniques qui nous montreraient la structure interne des filaments et les détails de toutes les connections transversales entre eux; le détail des diagrammes de diffraction des rayons X reste non interprété et l'interaction actine-myosine-ATP est encore à décrire en termes détaillés. Il y a tout espoir qu'on puisse résoudre, en suivant ces directions, le problème de la contraction musculaire.

Je suis reconnaissant à ma collègue, le Dr Jean Hanson: beaucoup d'idées exprimées dans cet article proviennent de notre travail en collaboration et les photographies au microscope optique données ici sont tirées de nos publications communes. Beaucoup d'idées similaires sur les mécanismes de la contraction ont été développées par A. F. Huxley et R. Niedergerke.

RÉFÉRENCES

[1] HILL, A. V. *Proc. Roy. Soc., B*, **126**, 136, 1938.
[2] *Idem. Ibid.*, **136**, 195, 1949.
[3] *Idem. Ibid.*, **136**, 399, 1949.
[4] HUXLEY, A. F. et TAYLOR, R. E. *J. Physiol.*, **130**, 49, 1955.
[5] HUXLEY, H. E. *Proc. roy. Soc., B*, **141**, 59, 1953.
[6] *Idem. Biochim. Biophys. Acta*, **12**, 387, 1953.
[7] HUXLEY, A. F. et NIEDERGERKE, R. *Nature, Lond.*, **173**, 971, 1954.
[8] HUXLEY, H. E. et HANSON, J. *Ibid.*, **173**, 973, 1954.
[9] ASTBURY, W. T. *Proc. roy. Soc., B*, **134**, 303, 1947.
[10] FLECKENSTEIN, A., JANKE, J., DAVIES, R. E. et KREBS, H. A. *Nature, Lond.*, **174**, 1081, 1954.
[11] MOMMAERTS, W. F. H. M. *Ibid.*, **174**, 1083, 1954.
[12] ENGELHARDT, W. A. et LJUBIMOWA, M. N. *Ibid.*, **144**, 669, 1939.
[13] SZENT-GYÖRGYI, A. *Stud. Inst. med. Chem. Univ. Szeged*, **1**, 17, 1942.
[14] WEBER, A. et WEBER, H. H. *Z. Naturforsch.*, **5b**, 124, 1950.
[15] WEBER, H. H. *Proc. roy. Soc., B*, **137**, 50, 1950.
[16] LAKI, K. et CARROLL, W. R. *Nature, Lond.*, **175**, 389, 1955.
[17] MOMMAERTS, W. F. H. M. *J. biol. Chem.*, **188**, 553, 1951.
[18] TSAO, T. C. *Biochim. Biophys. Acta*, **11**, 227, 1953.
[19] STRAUB, F. B. et FEUER, G. *Ibid.*, **4**, 455, 1950.
[20] WEBER, A. *Ibid.*, **19**, 345, 1956.
[21] TSAO, T.-C. *Ibid.*, **11**, 236, 1953.
[22] SZENT-GYÖRGYI, A. «Chemistry of Muscular Contraction». 2ème édition. Academic Press. New-York, 1951.
[23] MARSH, B. B. *Biochim. Biophys. Acta*, **9**, 247, 1952.
[24] WEBER, H. H. et PORTZEHL, H. *Progr. Biophys.*, **4**, 60, 1954.
[25] HASSELBACH, W. et SCHNEIDER, G. *Biochem. Z.*, **321**, 461, 1951.
[26] HANSON, J. et HUXLEY, H. E. *Nature, Lond.*, **172**, 530, 1953.
[27] HASSELBACH, W. *Z. Naturforsch.*, **8b**, 449, 1953.
[28] HUXLEY, H. E. et HANSON, J. (En préparation.)
[29] HANSON, J. et HUXLEY, H. E. *Symp. Soc. exp. Biol.*, **9**, 228, 1955.
[30] HUXLEY, A. F. *Progr. Biophys.* (sous presse).

Edmond Halley (1656–1742)

par SIR EDWARD BULLARD

Aux yeux de ses contemporains, et longtemps après sa mort, Halley fut le «second parmi les plus grands physiciens anglo-saxons». On se rappelle encore qu'il a prévu la date du retour de la comète de 1682 et que c'est sur ses instances que Newton a écrit les *Principia;* mais ses propres travaux, malgré leur très grande originalité, sont peu à peu tombés dans l'oubli. A l'occasion du tricentenaire de sa naissance, qui arrive le 29 octobre de cette année, il convient d'évoquer la vie et les travaux d'un homme doué d'un génie universel et d'une personnalité attachante.

Fils d'un riche savonnier de Londres, Halley était encore sur les bancs de l'école quand il calcula, d'après ses observations, que la déclinaison magnétique dans sa ville natale était de 2° 30′.

A dix-sept ans environ il passe de l'école à l'Université d'Oxford (*Queen's College*) et là il imagina un plan pour dresser le catalogue et la carte des étoiles australes. Avec la fougue qui le caractérise, il quitte Oxford avant la fin de ses études et, avec l'aide de Sir Jonas Moore, le Grand-Maître de l'artillerie, il obtient du Roi une lettre de recommandation à la Compagnie des Indes, à l'effet que celle-ci l'envoie à Ste. Hélène avec un ami, à bord d'un de ses navires. Durant l'année que Halley passa dans l'île le temps continuellement nuageux contraria ses observations. Les résultats de ces travaux parurent en 1679 sous forme d'un catalogue des positions de 341 étoiles. La carte de la figure 2 parut à la même époque. Il observa en outre un passage de Mercure sur le Soleil et reconnut là une méthode très efficace pour déterminer la parallaxe solaire. Il y revint constamment au cours de sa carrière, recommandant surtout l'observation du passage de Vénus qui devait se produire en 1761. Il remarqua aussi qu'il lui fallut durant le séjour de Ste. Hélène raccourcir le pendule de son horloge pour garder l'heure de l'endroit. Richer avait auparavant fait la même constatation à Cayenne, sans toutefois que Halley en ait eu connaissance.

De retour à Oxford il se vit dans une situation qui est assez fréquente même de nos jours: les travaux originaux qu'il avait accomplis étaient remarquables, mais ne s'étant pas déroulés dans les locaux de l'Université, ils ne remplissaient pas les conditions stipulées pour l'obtention d'un diplôme. Le principal du collège était bien disposé à son égard, mais craignait la résistance des membres de son Comité des Maîtres auxquels répugnait toute dérogation aux règles. Halley avait heureusement des amis puissants qui obtinrent du Roi une lettre prescrivant au Recteur de l'Université de lui accorder le grade de *Master of Arts* sans les formalités d'usage.

Le voyage à Ste. Hélène marque un tournant dans la carrière de Halley, lui donnant l'occasion de faire sa première contribution à la science et d'attirer l'attention du Roi et de plusieurs célébrités scientifiques ou politiques. Peu après son retour il est élu membre de la *Royal Society*. Il est probable en outre que ce voyage ait éveillé sa curiosité pour les choses de la mer et l'ait mis sur la voie des théories sur l'hydrographie, la plongée, les vents, le magnétisme terrestre, et la salinité de la mer, qui ont occupé ses plus fructueuses années.

Après la publication de son catalogue des étoiles australes, il passe deux ans en voyage sur le Continent. Il se rend d'abord à Dantzig chez Hévélius, pour tâcher de régler l'âpre controverse entre ce dernier et Hooke sur les mérites respectifs des pinnules simples et télescopiques. Halley ne peut convaincre Hévélius de la supériorité de ces derniers et constate à sa grande surprise que les observations faites avec les pinnules simples peuvent souvent se reproduire à dix secondes d'arc près. Il est à noter qu'il réussit à rester en bons termes avec les deux adversaires.

Quelques mois après son retour en Angleterre Halley, alors âgé de 25 ans, épousa Mary Tooke dont on ne sait rien sauf qu'elle était «une jeune fille attrayante, tant par la grâce de sa personne que par les qualités de son esprit». Elle fut sa compagne pendant 55 ans [3]. Il semble que

[1] E. F. MacPike [1, 2] a rassemblé et publié tout ce que l'on sait de la carrière de Halley. En conséquence, ceux des détails mentionnés ici qui pourraient être trouvés dans les livres de MacPike ne feront l'objet d'aucune référence bibliographique. La biographie la plus détaillée de Halley se trouve dans *Biographia Britannica* [3].

n'ayant pas besoin de travailler pour vivre il se soit adonné entièrement à l'astronomie.

Pendant les trois années qui suivirent il mit au point un plan d'observations qui devaient s'étaler sur 18 ans et aboutir à une table corrigée des mouvements de la Lune. Son tempérament s'accordant mal à des travaux de si longue haleine, il passa bientôt à d'autres.

En 1684, Halley se rend à Cambridge auprès de Newton, alors âgé de 42 ans, et lui demande s'il peut prouver que l'orbite d'une planète est elliptique si l'attraction que le Soleil exerce sur elle est en raison inverse du carré de sa distance. Newton répond qu'il a déjà prouvé la chose, mais qu'il n'a pas sous la main le mémoire qui s'y rapporte; qu'il l'enverra plus tard. En effet, deux jours après il envoie à Halley deux épreuves. C'est ainsi que Halley, qui avait compris l'importance de l'œuvre de Newton, amena celui-ci avec beaucoup de tact et d'habileté à développer ses théories, à les communiquer à la *Royal Society* et enfin à les publier en 1687 dans les *Principia* [5]. Les lettres de Halley sont pleines de témoignages de respect et de dévouement à l'égard de Newton, et il s'est donné souvent beaucoup de peine pour l'aider.

En 1686 Halley devint secrétaire-adjoint de la *Royal Society*. Son portrait (figure 1) qui se trouve dans le bureau de l'actuel secrétaire-adjoint, fut peint à la même époque. Il occupa le poste 13 années durant lesquelles il se chargea de la plupart de la correspondance de la Société et assista à toutes ses réunions ainsi qu'à celles de son Comité. Il dirigeait la publication des *Philosophical Transactions* dont il rédigeait lui-même environ le quart. Il participait aux discussions sur des questions très variées et d'après les procès-verbaux il prit la parole à 26 réunions au cours de l'année 1691. En 1692 ses communications orales ou écrites portent sur la mesure de la vitesse des navires, le magnétisme terrestre, l'origine des sources et des rivières, les cloches à plongeurs, l'imperméabilisation des scaphandres, le polissage des miroirs télescopiques, l'écoulement de l'eau par une ouverture dans un récipient, l'invention d'un instrument qui annonce le sextant moderne, la dimension des objets vus sous l'eau, un support d'aiguille de boussole, la précision des observations qu'il a faites à Ste. Hélène, le ralentissement de la marche de la Lune dans son orbite que révèlent les éclipses anciennes, une méthode pour enlever la terre des excavations, la prévision des éclipses, la construction d'un cœlostat, la théorie et les méthodes d'observation de la Lune, un moyen d'amarrer les canons d'un vaisseau par mauvais temps et «la figure de Céphée». Pendant des années ce fut un courant ininterrompu de théories, d'inventions, et d'expériences. Certaines étaient sans doute assez naïves, mais la plupart étaient originales, ingénieuses et intéressantes au plus haut point. Les plus remarquables des travaux de cette période sont les deux mémoires qui ont trait à la déclinaison de la boussole et qui parurent dans les *Philosophical Transactions* de 1683 et 1692 [6].

Dans le premier mémoire Halley présente 55 observations effectuées entre 1580 et 1682 en 47 points différents et s'en sert pour réfuter les suggestions de Gilbert et de Bond: selon le premier la variation provient de l'attraction du pôle nord de l'aiguille par le magnétisme des masses continentales, et le second l'attribue à l'attraction d'un dipôle incliné par rapport à l'axe de rotation de la Terre. Une autre théorie, celle de Descartes, attribue la variation à des masses de fer et de magnétite. Halley pour sa part est d'avis que, malgré la présence de certains centres d'attraction locaux, les variations sont à l'échelle continentale. Par exemple, partout dans l'océan Indien la déclinaison ayant le même sens, la cause d'attraction doit se situer très loin. Il suggère dans son premier mémoire que quatre pôles situés dans les régions arctiques suffisent pour expliquer les variations observées dans le monde entier. Ses arguments sont «qualitatifs» car «il n'ose pas encore en calculer la valeur pour un lieu donné», les observations étant peu nombreuses et certaines d'une précision douteuse. Et il ajoute que du moment que l'on ignore en quelle proportion la force d'attraction décroît à mesure que l'on s'éloigne du pôle d'un aimant, il est futile d'essayer de se lancer dans des calculs. Quelques années plus tard Halley fit des expériences dans la cour de *Gresham College* avec «le grand aimant de la Société». Ces expériences laissent supposer l'existence d'une loi de «l'inverse du cube», mais Halley n'en reparlera plus, peut-être parce qu'elles indiquent la variation de la force selon la distance en dehors de l'aimant et non la variation à la surface, qu'il cherchait.

Dans le second mémoire Halley étudie les variations séculaires de la déclinaison. Il démontre par de nombreux exemples que ces phénomènes indiquent manifestement que l'ensemble du système magnétique est transporté par un, ou plus d'un, mouvement d'envergure telle que ses effets se font sentir d'un pôle à l'autre. Ce mouvement ne se fait pas *per saltum* (par bonds) mais par une progression lente et régulière vers

l'ouest. Il évoque alors les grandes difficultés que cela représente pour toute théorie du magnétisme terrestre: «étant donné la structure de notre globe terraqué, on ne peut supposer qu'une partie considérable de sa masse puisse se mouvoir en lui sans que son centre de gravité et son équilibre général en soient affectés, ce qui provoquerait des cataclysmes sans précédents dans l'histoire du monde: déplacement de l'axe de rotation, bouleversement de la surface des mers, amoncellement des eaux dans certains endroits et recul dans d'autres». Le phénomène se produirait sur une échelle trop vaste, et il y a trop de distance entre les endroits pour qu'ils soient affectés par un déplacement fortuit de matière magnétique soit dans les entrailles de la Terre soit à sa surface.

Halley propose comme solution une hypothèse hardie: la Terre aurait un noyau central dont la rotation serait moins rapide que son écorce. Celle-ci aurait deux pôles (les pôles magnétiques fixes de Gilbert) et le noyau deux autres, différents, qui seraient constamment portés vers l'ouest par rapport à la surface de la Terre en raison du retard de la rotation du noyau par rapport à celle de l'écorce. Après quelques brèves remarques sur l'élasticité du système et sa stabilité, l'auteur fait mention des objections qui pourraient être soulevées.

Halley considérait sans doute cette théorie comme étant provisoire, car, ajoute-t-il, il pourrait bien exister plus de quatre pôles et plus de deux sphères concentriques. Dans un de ses portraits, exécuté quand il avait 80 ans, il tient en main un dessin tiré de son mémoire de 1692 et représentant trois sphères concentriques à l'intérieur de la Terre. Il évalue l'écart annuel entre la vitesse de rotation du noyau et celle de l'écorce à 0,5°, «mais, dit-il, c'est à la lointaine postérité qu'en est réservée la détermination précise; nous ne pouvons aspirer qu'à laisser à nos successeurs des observations auxquelles ils puissent se fier et des hypothèses qu'ils auront le loisir d'examiner, corriger ou réfuter». En fait les valeurs annuelles actuelles se placent entre 0,2° et 0,3°.

On peut dire sans exagération que la lecture des deux mémoires de Halley nous en apprend plus sur l'origine du champ magnétique terrestre et sa variation séculaire que tout ce qui a été écrit au cours des 250 années qui suivirent. Les points essentiels ne lui ont pas échappé: que l'universalité des variations ne s'accorde pas avec l'hypothèse d'une origine purement locale, et que la courbe temporelle des variations séculaires ne relève pas de la géologie mais suppose l'existence d'un noyau mobile. La théorie a été reprise récemment; il est maintenant certain que la Terre possède un noyau fluide et on peut présumer l'existence de processus capables d'y entretenir des courants électriques et, partant, un champ magnétique. Cette théorie est plus souple que celle du noyau solide de Halley à magnétisme permanent, et permet la croissance et la décroissance du champ non-bipolaire (les pôles additionnels de Halley), en sus de leur mouvement vers l'ouest. Halley a atteint la limite du possible sans l'électro-magnétisme, et il est surprenant que l'avance dans cette voie ait été nulle pendant si longtemps.

Il n'est pas possible d'évoquer ici tous les sujets qui sollicitèrent l'attention de Halley à cette époque; quelques-uns devront suffire. En 1693 il publie une évaluation de la longévité humaine basée sur «les curieuses tables des naissances et des enterrements survenus en la cité de Breslau; suivie d'un projet de calcul des annuités à vie». C'est là une des premières tentatives de dresser des tables de rentes viagères d'après les statistiques. L'un de ses mémoires sur des sujets mathématiques, consignés dans les *Philosophical Transactions*, a trait à certaines méthodes itératives pour trouver les racines des nombres. Ces méthodes ont acquis de l'importance récemment, étant couramment utilisées par les machines à calculer électroniques pour la détermination des racines. Il est d'autre part étonnant que Halley ait été au courant de l'importance pratique de la convergence rapide: il sait, par exemple, que si a est la racine cubique approximative de $(a^3 + b)$, $a + ab/(3a^3 + b)$ sera alors une approximation telle que «les chiffres qui composent la racine sont au moins triplés, alors que par toute autre méthode, les chiffres seront augmentés d'un nombre égal aux nombres donnés». Il démontre dans un autre mémoire que l'Angleterre reçoit, au cours d'une journée d'été plus de chaleur solaire que l'Inde. Deux communications, l'une au sujet de l'époque et du lieu probable du premier débarquement de Jules César en Grande-Bretagne et l'autre sur l'alphabet chinois, donnent une idée de la diversité de ses activités.

Il prend un brevet pour un modèle de cloche à plongeurs [7, 8] en 1691 et met sur pied une compagnie pour l'exploiter; les valeurs en bourse des actions de cette compagnie parurent dans les journaux pendant quelques années [7].

En 1696, lors du renouvellement des pièces d'argent, Newton fut nommé Directeur de la Monnaie. L'entreprise était d'envergure et nécessita l'ouverture d'ateliers de frappe dans cinq

villes provinciales. Halley devint inspecteur-adjoint de celui de Chester et y demeura jusqu'en 1698 [9]. De là il adressa à la *Royal Society* plusieurs lettres qui figurent dans les *Philosophical Transactions*. La plus intéressante décrit le transport d'un baromètre à mercure jusqu'au sommet de Snowdon.

Quand Halley revint à Londres en 1698 le tsar Pierre le Grand s'y trouvait en visite. Celui-ci, âgé de 26 ans, venait de prendre les rênes du gouvernement de la Russie, et voyageait dans le dessein d'étudier la construction navale et la navigation. C'est ainsi qu'il fit la connaissance de Halley, l'admit à sa table et se prit d'amitié pour lui [3]. On raconte même qu'il prit place dans une brouette que Halley fit rouler à travers une haie appartenant à John Evelyn, l'auteur du fameux «Journal». L'anecdote ne semble reposer sur aucun fondement sauf la mention de trois brouettes et d'une haie dans une note de £350 que le Service des Travaux Publics eut à payer pour dommages infligés par le tsar à la maison et au jardin d'Evelyn [8, 10].

Après le départ du tsar Halley se lança dans la plus grande entreprise de sa vie. Il reçut de l'Amirauté le commandement d'un petit vaisseau, le *Paramour*, avec ordre de faire voile vers la côte est de l'Amérique du Sud et la côte occidentale de l'Afrique, et de faire escale dans le plus grand nombre d'îles possible, puis de «s'avancer assez loin au sud pour découvrir la côte de la Terre Inconnue que l'on croit située entre le détroit de Magellan et le Cap de Bonne-Espérance». Il s'agissait de déterminer la déclinaison magnétique et la longitude de tous ces endroits.

Parti de Deptford au mois d'octobre 1698 il fut retardé par des voies d'eau et un lestage défectueux. En février 1699 il atteignit le Brésil, mais la saison trop avancée ne lui permit pas de poursuivre son voyage vers le sud. Cette raison, jointe à des dissentiments avec ses officiers, le décida à reprendre la route de l'Angleterre, où il parvint en juin 1699. Après avoir fait traduire en cour martiale et réprimander son premier lieutenant pour insubordination, il se remit en route dans le même navire. Cette fois après escales aux îles du Cap Vert et à Rio de Janeiro, il atteignit la latitude 52½° S., et le 1er février 1700 «il rencontra de grandes îles de glace d'une dimension si incroyable que j'ose à peine les décrire». Il se vit bientôt en danger immédiat de perdre le navire et la vie, étant environné de glace de tous côtés, «dans un brouillard si épais que nous ne pouvions la voir qu'au moment de l'aborder» [17]. Il réussit toutefois à échapper à ces dangers et regagna l'Angleterre vers la fin du mois d'août, en passant par Tristan da Cunha, Ste. Hélène, le Brésil, les Antilles et les Bermudes.

Il rapporta 115 observations de la déclinaison magnétique, lesquelles servirent, avec d'autres, à l'établissement d'une carte des lignes isogoniques de l'Atlantique. Cette carte (figure 4) fut la première à représenter la déclinaison, ou tout autre valeur, de cette façon. Cent ans après on appelait encore ces courbes les «lignes de Halley». En 1702 Halley construisit une carte semblable pour le monde entier sauf le Pacifique (figure 3). Au cours des 50 années qui suivirent, cette dernière carte, très appréciée des navigateurs, subit plusieurs remaniements. Le professeur Chapman a décrit les cartes de Halley de façon détaillée [11].

Pendant ses voyages Halley fit des déterminations de longitude au moyen d'observations de la Lune. De plus il avait à bord un baromètre ingénieux construit par Hooke, où la différence de lecture entre deux thermomètres, l'un à alcool et l'autre à air, donnait la pression atmosphérique. C'était la première fois que l'on se servait d'un baromètre en mer et Halley affirme qu'il en obtint des indications certaines de l'approche des tempêtes [12].

L'année suivante Halley commande encore le *Paramour*. Il obtient de l'Amirauté la mission d'observer pendant tout l'été le régime des marées dans la Manche, en haute mer et près des côtes; de déterminer l'orientation exacte des principaux caps de la côte anglaise, l'un par rapport à l'autre, et relever la distance entre autant de points que possible d'une côte et les points correspondants de l'autre côte, en suivant le méridien qui les relie, afin d'établir exactement la configuration des deux côtes. On travailla dur tout l'été et sur toute l'étendue de la Manche. Dans une lettre au Secrétaire de l'Amirauté Halley se plaint de «l'effort considérable que son équipage restreint eut à fournir pour lever l'ancre sans cesse en eau si profonde»; et il ajoute que l'ennemi le plus redoutable est le vent qui, fouette la mer au point d'interdire tout mouillage. Ceux qui ont eu l'occasion d'ancrer un petit bateau en eau profonde dans ces parages partageront son sentiment. Aussitôt rentré Halley dressa une nouvelle carte de la Manche.

Il passe une grande partie des années 1702 et 1703 à visiter Vienne et l'Istrie en qualité d'expert envoyé par le gouvernement britannique pour la fortification des ports de l'Adriatique. Agé alors

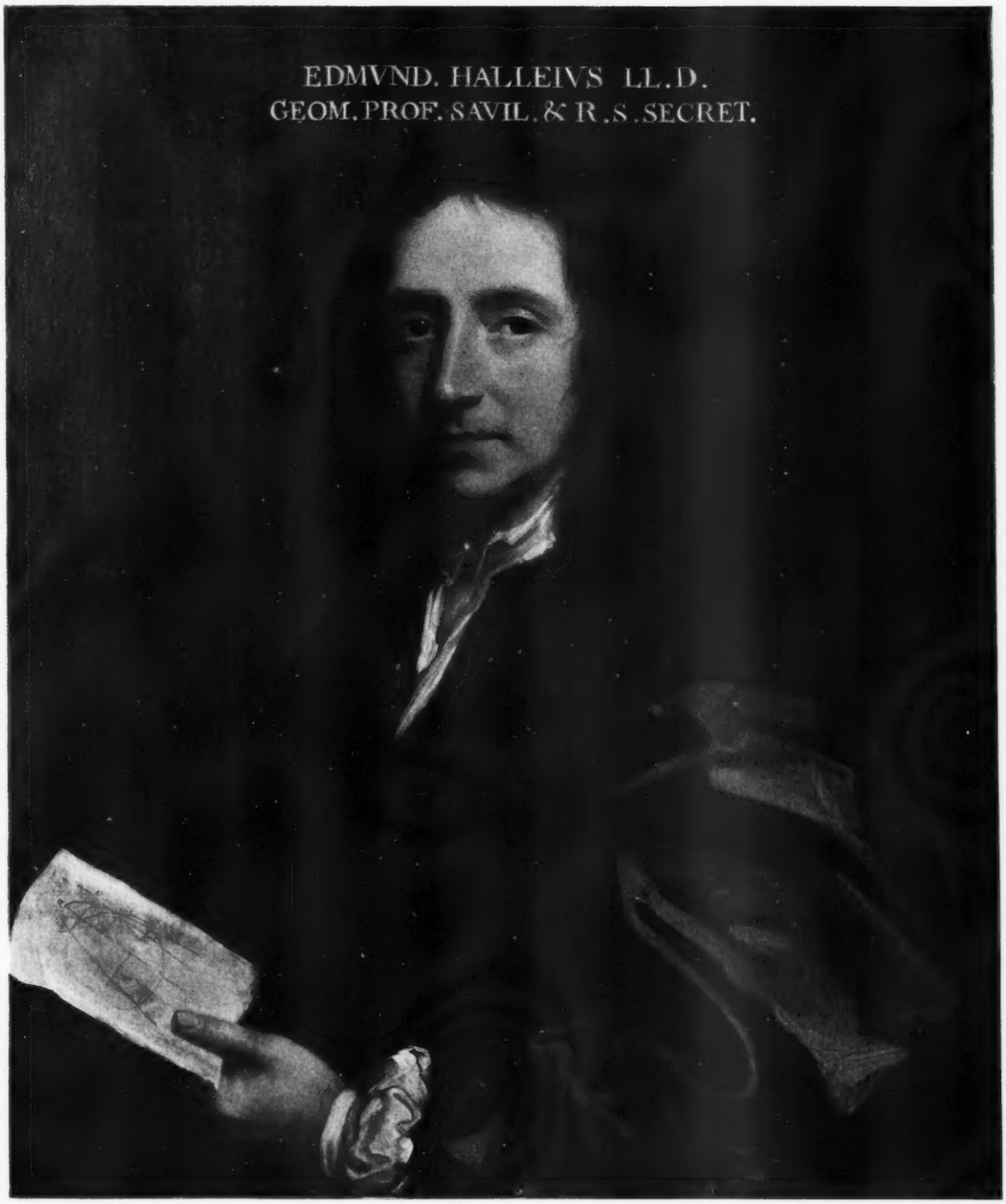


FIGURE 1 – *Halley à 30 ans. Peinture attribuée à Thomas Murray. Halley tient en main une figure représentant une méthode géométrique pour trouver les racines d'une équation cubique ou biquadratique au moyen de l'intersection d'un cercle et d'une parabole. Ce dessin figure dans deux mémoires parus dans les* Philosophical Transactions *de* 1687. *Le tableau date probablement de la même époque; Halley venait alors d'être nommé secrétaire de la* Royal Society. (*Reproduction aimablement autorisée par la* Royal Society.)

de 47 ans, il est le plus connu des membres de la *Royal Society*; mathématicien, astronome et physicien éminent, il est de plus un homme qui connaît la vie; «parle, jure et boit du brandy comme un loup de mer» [14]. Il n'est pas riche, mais il a réussi à poursuivre ses travaux scientifiques en travaillant d'abord pour la Monnaie à Chester, puis au service de l'Amirauté. Vers la fin de 1703, il succède au Dr. Wallis, décédé, comme titulaire de la chaire Savile de géométrie à Oxford. C'était sa troisième candidature à une chaire Savile: en 1678, âgé de 21 ans et pas encore diplômé, il avait été proposé pour une chaire d'astronomie qu'Edward Bernard avait l'intention d'abandonner [15]. Celui-ci occupa en fait le poste jusqu'en 1691. Le deuxième fois ce fut David Gregory qui l'emporta, en raison, paraît-il, du caractère douteux des convictions religieuses de Halley, lequel était accusé d'avoir «affirmé l'éternité de l'univers». Il est difficile actuellement de se faire une idée des opinions religieuses de Halley; elles n'étaient sans doute pas absolument orthodoxes, mais il est douteux qu'elles aient été entachées d'athéisme. Il ne pouvait non plus croire à l'éternité de l'univers puisqu'il savait que l'existence de la moindre friction s'opposant au mouvement des planètes l'interdisait. Dans un mémoire écrit ultérieurement il suggère que l'âge de la Terre pourrait être estimé d'après l'accumulation de sel dans la mer, et devrait donc être fini.

Dès son arrivée à Oxford il entreprit la préparation d'une édition du *Sectione Rationis* et du *Conicorum* d'Apollonius dont il avait déjà publié une partie en 1700. Il existait une version latine de la plus grande partie du texte grec de ces ouvrages, mais deux livres du *Sectione Rationis* et trois des *Conicorum* n'existaient qu'en version arabe. Après avoir pris quelques brèves leçons d'un arabisant distingué, Halley rédigea une traduction satisfaisante des livres en question et mit au point quelques passages falsifiés du texte arabe. Un livre manquait complètement; Halley le reconstitua d'après un résumé que Pappus en avait fait, et certaines indications glanées dans les autres œuvres d'Apollonius.

En 1705 Halley achève et publie son *Synopsis Astronomiae Cometicae* commencé vers 1695. Ayant dressé une table des observations effectuées sur les comètes depuis 1337, il en déduit que les orbites de 24 d'entre elles ont des éléments paraboliques. La ressemblance entre les éléments de la comète de 1682 et ceux des comètes de 1607 et de 1531 lui donnent à penser que ces météores ne sont que des retours successifs, à 75 ans d'intervalle, d'une seule et même comète dont l'orbite n'est pas une parabole mais une ellipse allongée. Halley prédit son retour pour 1758, et suppose que plusieurs autres comètes pourraient bien décrire une trajectoire elliptique. Cette découverte bien que publiée en 1705 date en réalité de 1695. Kepler, Hévélius et les Cassini avaient avant lui tenté, sans succès d'ailleurs, de déterminer par des méthodes empiriques les orbites cométaires, et Newton avait trouvé une vérification éclatante de sa mécanique céleste en démontrant que les comètes décrivaient en effet une trajectoire presque parabolique. Or Halley arrive à prouver que les orbites cométaires diffèrent notablement de celles des planètes en ce que comètes «ne suivent aucun ordre établi, ne sont pas confinées comme les limites du zodiaque, mais se déplacent en tous sens, d'un mouvement rétrograde aussi bien que direct». Halley croit également à la possibilité du choc de la Terre par une comète.

En 1712 Halley édite les observations astronomiques de Flamsteed. Cet événement marque le point culminant d'une longue controverse où Halley et Newton s'efforcèrent d'amener Flamsteed par la persuasion, puis par la contrainte, à publier son catalogue des étoiles fixes, et des positions observées de la Lune et des planètes. Charles II avait en 1675 appelé Flamsteed à la direction de l'observatoire de Greenwich qu'il venait de faire construire. Les appointements annuels du poste étaient de £100 et le titulaire ne recevait aucun appareil et n'était assisté que d'un «manœuvre», de sorte que ses dépenses dépassaient de beaucoup ses salaires et qu'il considérait, non sans justification, que ses observations lui appartenaient en propre. Ce fut aussi par la suite l'avis de Halley et de Bradley. Flamsteed voulait publier ses observations sous forme d'un ouvrage complet, dans l'ordre qu'il considérait comme logique: d'abord ses observations, puis les cartes d'étoiles, le catalogue et enfin les positions, du Soleil, de la Lune et des planètes. Pendant 45 ans il adhéra avec rigueur à ce plan d'observations et de calculs. Les observations étaient de très loin supérieures à celles contenues dans les catalogues de Tycho Brahe et d'Hévélius, qui s'étaient servis de pinnules simples, et les résultats en auraient été très utiles à la navigation d'une part et d'autre part à Newton et à Halley pour l'essor qu'ils voulaient donner à l'astronomie. Un conflit devenait dès lors inévitable. On conçoit avec quelle impatience Newton et Halley voyaient Flamsteed tenir en réserve une masse de données importantes, tout en discutant de la forme qu'il

FIGURE 2 – *Carte des étoiles australes dressée par Halley d'après les observations effectuées à Ste. Hélène. On y voit* Robur Carolinum *la nouvelle constellation nommée en honneur de Charles* II. *Aux coins, en haut: petits dessins représentant le passage de Mercure observé à Ste. Hélène. C'est probablement la carte que Halley donna à Hooke le* 31 *octobre* 1678 [4] *et que celui-ci présenta à la* Royal Society *le* 7 *novembre. Il en existe une copie au* British Museum *reliée avec le catalogue de Halley. Cependant, les autres exemplaires du catalogue ne contiennent pas cette carte, et celle de l'auteur, reproduite ici, n'a jamais été pliée pour être insérée dans le catalogue: elle a donc paru séparément.*

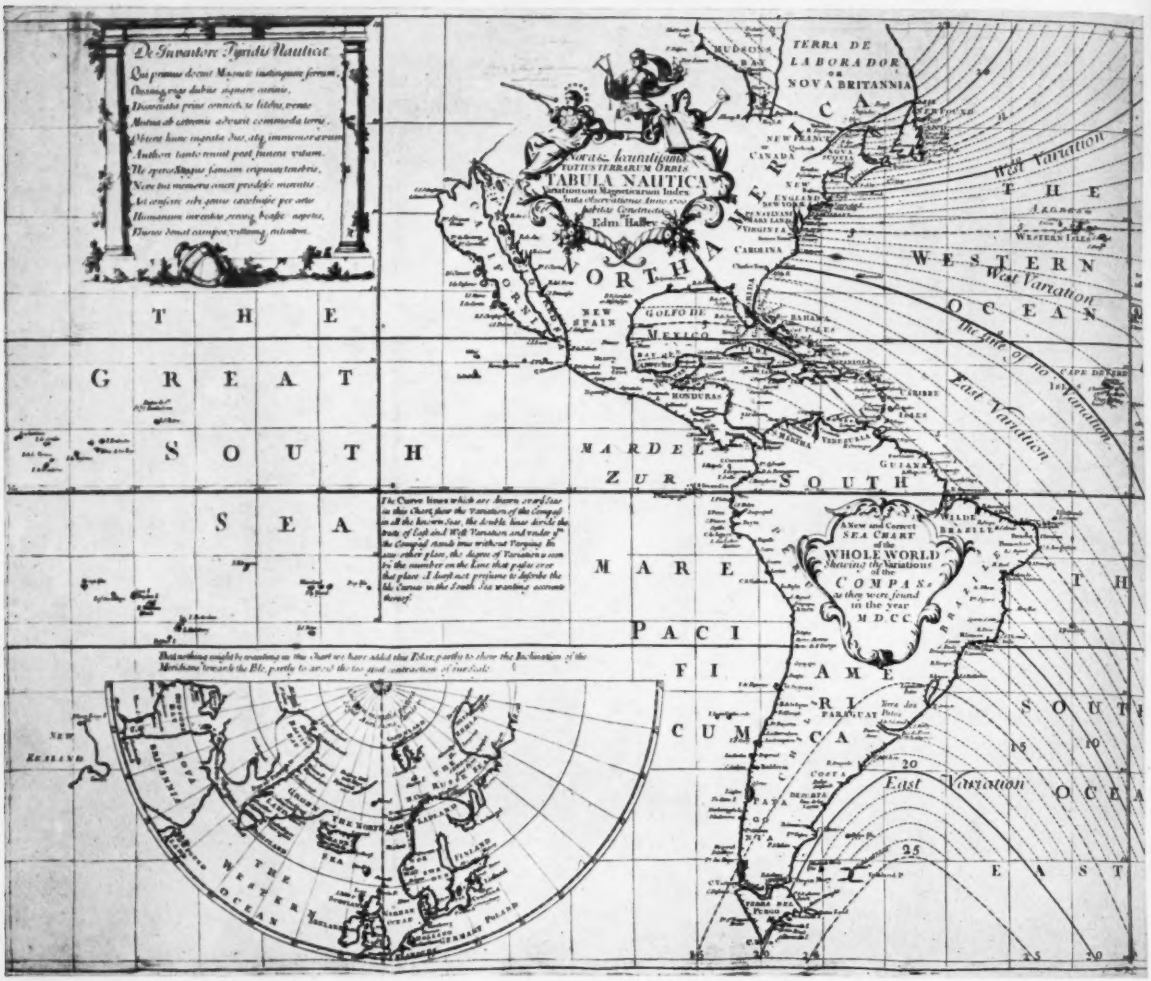
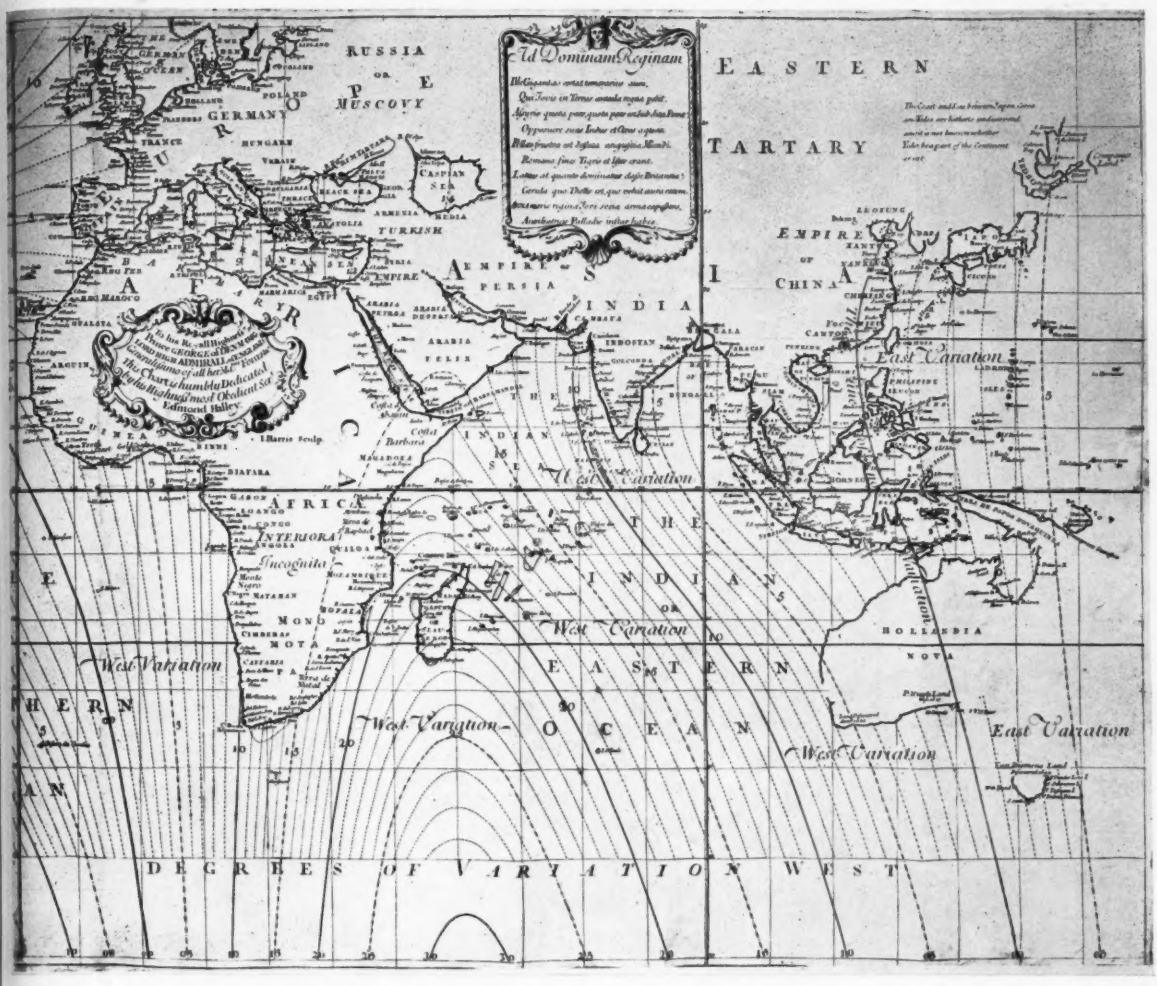


FIGURE 3 – *Mappemonde de Halley, représentant les lignes «isogoniques» de déclinaison dans les deux hémisphères. Remarquer*

convenait de donner aux cartes de constellations et des noms latins destinés à désigner les «jointures» des figures mythologiques qu'elles représentaient. Flamsteed n'aimait pas Halley avec qui il s'était autrefois disputé au sujet des marées de Dublin, de sorte qu'avec le temps son irritation envers ceux qui le harcelaient sans cesse pour qu'il publiât ses observations se mua en folie de la persécution, et il se mit à formuler contre eux les accusations les plus extravagantes. Par exemple, au sujet de la *Royal Society* dont le président était Newton et Sloan le secrétaire, il dit qu'elle «est menée par des gens qui soit n'ont d'égards que pour leurs propres intérêts, soit ne savent que planter des choux et font beaucoup de bruit pour couvrir leur ignorance». Il accuse Newton d'avoir instigué l'imprimeur à commettre des erreurs dans son Catalogue, et Halley, qui l'avait aidé 30 ans auparavant, de l'avoir fait écrire *rem*: au lieu de *prox*: dans l'intention de vicier son observation. Il écrit, en 1692, à Newton à propos de Halley: «Je n'estime guère un homme qui a perdu sa réputation de compétence, de droiture et de sincérité par ses sottises, son ingratitude et son verbiage inepte. Ce n'est pas que j'attache une importance quelconque à ses calomnies et à celles de ses mécréants



l'absence de lignes pour l'Océan Pacifique. La carte parut pour la première fois en 1702 et fut remaniée plusieurs fois par la suite.

d'amis, sachant fort bien que le Christ et ses apôtres n'y échapperaient pas s'ils revenaient sur cette terre. Ce que je hais chez lui, ce n'est pas l'homme, c'est le goujat; s'il était honnête homme, ou avait seulement un peu de politesse, il n'y a pas d'autre homme dont la compagnie m'aurait plu davantage» [13, p. 133]. En définitive, quand il vit qu'il n'arriverait jamais à s'entendre avec Flamsteed, Halley, malgré l'opposition véhémente de celui-ci, publia le catalogue des étoiles et certains documents qui l'intéressaient particulièrement ainsi que Newton.

Les détails de cet incident mettent en évidence les caractères des trois personnages en cause: Flamsteed, c'est le pédant méticuleux, susceptible et soupçonneux, mais en même temps l'astronome observateur le plus doué de son époque; Newton est ombrageux, souvent brutal et quelque peu insensible, ayant toujours en vue ce qu'il croit être un devoir envers la société; Halley enfin c'est l'homme pratique, certain de pouvoir utiliser les observations de Flamsteed mieux et plus vite que Flamsteed lui-même, tâchant d'avoir du tact et de ménager tout le monde, mais à la fin négligeant toute prudence et publiant l'œuvre d'un autre malgré les protestations de l'auteur. En 1715 la

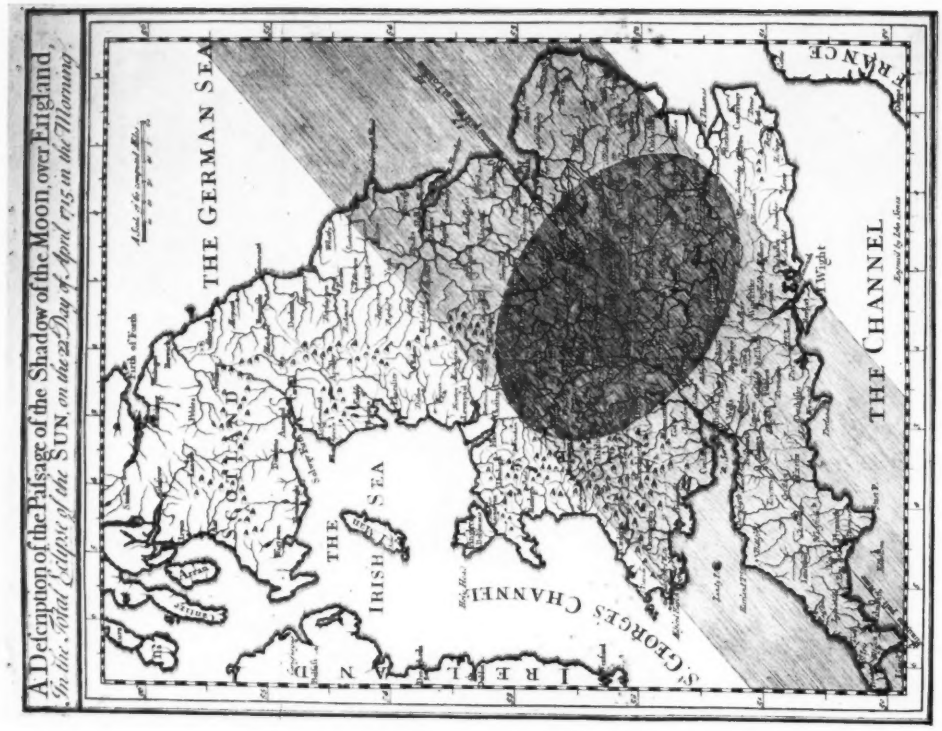


FIGURE 5 – *Carte de l'éclipse totale de 1715, dressée par Halley d'après ses observations.*

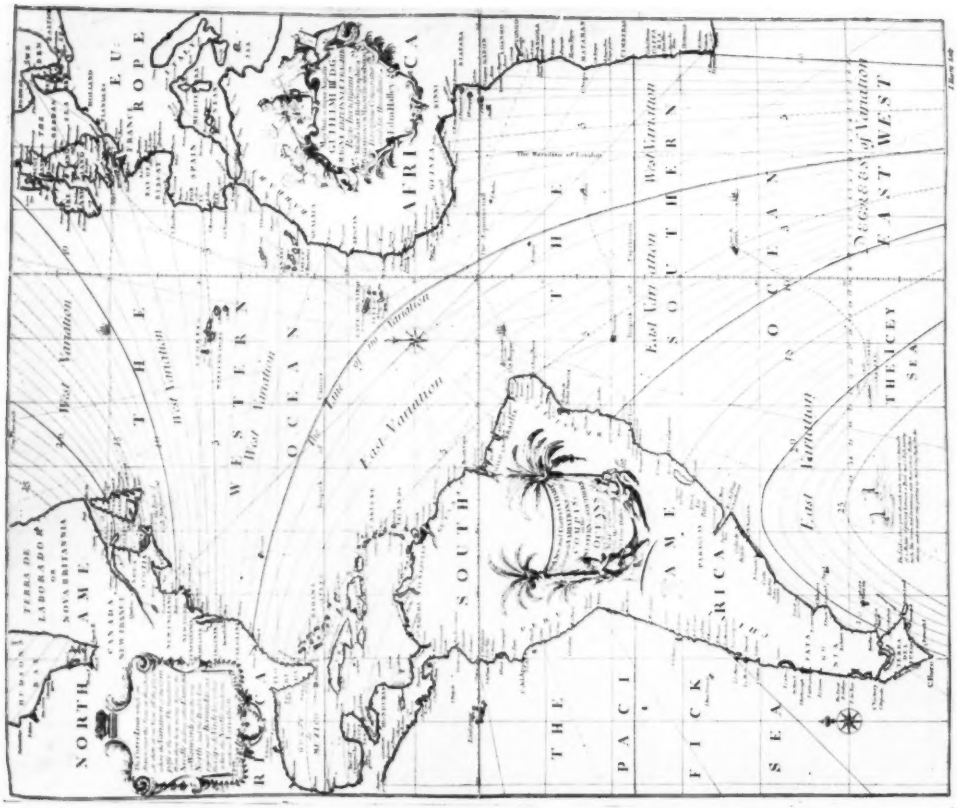


FIGURE 4 – *Carte établie par Halley des déclinaisons magnétiques dans l'Océan Atlantique. Publiée en 1701.*

mort de Halifax réduisit l'influence que Newton exerçait sur le Gouvernement, et Flamsteed se fit livrer 300 des 400 exemplaires du livre que Halley avait fait imprimer. Il préleva dans chaque exemplaire les 97 feuillets où se trouvaient ses observations et brûla tout le reste. Les 97 feuillets figurèrent par la suite dans l'*Historia Coelestis* publiée après la mort de Flamsteed par sa veuve.

Durant les quelques années qui suivirent, Halley publia un certain nombre de mémoires, la plupart sur des questions astronomiques. Le plus intéressant a trait à ses observations de l'éclipse solaire totale visible à Londres en 1715. Il l'a observée lui-même de sur le toit du local de la *Royal Society*, et il décrit la couronne et les protubérances. La figure 5 représente la carte qu'il en a faite.

Flamsteed meurt en 1720 et Halley lui succède comme Astronome Royal. Les exécuteurs testamentaires de Flamsteed ayant enlevé tous les instruments qui se trouvaient dans l'observatoire, ce n'est qu'après un certain temps que Halley put effectuer des observations régulières. Il se mit alors, bien qu'il eût 65 ans révolus, à réaliser un projet formé 40 ans auparavant: celui d'observer la Lune pendant toute la période du Saros (18 ans). Il y réussit, bien que le travail ait laissé à désirer par certains côtés [16], et qu'il n'ait pas été jugé digne d'être publié, fait unique quand il s'agit des observations d'un Astronome Royal. Ses tables astronomiques furent publiées en latin après sa mort, en 1749. Elles furent rééditées plusieurs fois en anglais et en français.

Vers la fin de sa longue existence Halley souffrit de quelques infirmités, probablement à la suite d'une attaque d'apoplexie. Il perdit ses dents et vécut surtout de poisson. Rien cependant ne put lui ôter sa bonne humeur: ni ses études abstraites, ni les infirmités de la vieillesse, ni même la paralysie qui l'accabla quelque temps avant sa mort, et cette heureuse disposition naturelle s'alliait chez lui «à la quiétude d'esprit qui est un des bienfaits que confère la vertu» [3]. A sa mort en 1742, âgé de 85 ans, il était encore titulaire de la chaire Savile de géométrie et du poste d'Astronome Royal. Il touchait en outre une pension de retraite de capitaine de vaisseau.

Quand on fait le point des activités et des réalisations de Halley, on voit clairement que son principal mérite est d'avoir su rassembler des données et en tirer parti. Il accumule constamment des renseignements de qualité variable, souvent erronés ou contradictoires, et réussit à y mettre de l'ordre, qu'il s'agisse d'observations sur le magnétisme, sur les marées de la Manche, sur les comètes, sur l'éclipse de 1715 ou sur l'orbite lunaire. Il en est de même pour son remarquable travail sur le grand météore de 1719 et son étude des vents alizés. Ses hypothèses étaient souvent téméraires et l'on sait maintenant que ses conclusions étaient parfois fausses; mais il avait l'intuition des choses physiques et fut aussi un mathématicien de premier ordre. Ce n'est qu'à notre époque qu'a été reprise l'étude des questions qui ont intéressé Halley le plus vivement, de sorte qu'à nos yeux, loin d'être un simple disciple de Newton, il fait figure de précurseur. La reconnaissance que nous lui devons et notre respect pour son énergie augmentent du fait qu'il fut le premier à obtenir de l'Amirauté un vaisseau en emprunt pour une expédition scientifique, et que c'est grâce à lui que l'Etat se chargea d'acheter des instruments pour l'observatoire de Greenwich.

BIBLIOGRAPHIE

[1] MacPike, E. F. «Correspondence and papers of Edmond Halley». Oxford University Press, Londres. 1932.

[2] *Idem.* «Hevelius, Flamsteed and Halley». Taylor and Francis Limited, Londres. 1937.

[3] «Biographia Britannica», 2494–2520. 1757.

[4] «The diary of Robert Hooke», publié par H. W. Robinson et W. Adams. Taylor and Francis Limited, Londres. 1935.

[5] Brewster, D. «Memoirs of the life, writings and discoveries of Sir Isaac Newton». Constable and Company Limited, Londres. 1855.

[6] Halley, E. *Phil. Trans.*, **13**, 208, 1683; **17**, 468, 1692. Ces deux articles ont été réimprimés dans *Miscellanea Curiosa*, dont la deuxième édition a fourni les citations faites dans le présent article.

[7] Houghton, J. «A collection for the improvement of husbandry and trade». Londres. 1692–1700.

[8] Archives officielles.

[9] Craig, J. «Newton at the mint». Cambridge University Press, Londres. 1946.

[10] *Notes and Queries.* (2), 1, 365, 1856.

[11] Chapman, S. *Occas. Notes R. astr. Soc.*, No. 9, 117, 1941.

[12] Halley, E. *Phil. Trans.*, **22**, 791, 1701.

[13] Bailey, F. «An account of the Revd. John Flamsteed». Amirauté, Londres. 1835.

[14] Lettre de Flamsteed à son ancien adjoint A. Sharp, en date du 8 décembre 1703, reproduite en [13].

[15] Lettres de Flamsteed à Bernard, en date du 22 juin et du 8 février 1677–8, reproduites à la page 667 du supplément de [13].

[16] Bailey, F. *Mem. R. astr. Soc.*, **8**, 169, 1835.

[17] Dalrymple, A. «A collection of voyages chiefly in the southern Atlantick Ocean». Londres. 1775.

Aspects dynamiques du pneu

par G. TEMPLE

Si le pneu a été décrit amplement sous l'angle de la technologie et de la construction il ne semble pas avoir reçu la même attention du physicien et du mathématicien. On examinera ici le comportement mécanique du pneu d'après sa réaction aux forces diverses qui interviennent lors de la manœuvre de la roue et du véhicule. Bien qu'on ait obtenu des résultats fort intéressants, la structure et le comportement complexes du pneu n'ont pas permis jusqu'ici d'en établir une théorie complète et satisfaisante.

Le comportement du pneu est souvent des plus bizarre et même la dynamique de Newton est loin d'être à même d'en expliquer tous les mystères qui offrent encore à la recherche un domaine fertile en surprises. Tout comme les problèmes de la construction mécanique se présentent sous leur forme la plus difficile dans la construction aéronautique, de même tous leurs problèmes s'accentuent à l'extrême quand on fixe des pneus à des roues d'avion. Les problèmes posés par l'atterrissage, le roulement sur le sol, la conduite, et le freinage des roues d'avion ont imprimé un grand élan à la recherche sur les pneus; le rapport publié par l'*Aeronautical Research Council* [1] constitue le compendium le plus précieux sur les caractéristiques mécaniques des pneus.

CLASSEMENT DES PROBLÈMES

Du point de vue du savant sinon de celui de l'ingénieur il est commode et systématique d'étudier le comportement mécanique du pneu d'après ses réactions aux forces de type varié qui surgissent aux cours des manœuvres diverses de la roue et du véhicule auquel elle est attachée.

En premier lieu le pneu est appelé à soutenir la charge de l'axe vertical, soit comme charge constante lorsque le véhicule est au repos ou en roulement au sol, ou comme charge variable lorsque l'avion touche la piste d'atterrissage.

En deuxième lieu le pneu sert de milieu pour la transmission des forces horizontales en avant et en arrière pour la progression et le freinage de la roue.

Pour finir, le pneu est appelé à fournir les forces horizontales latérales nécessaires pour la conduite.

Les manœuvres précitées sont toutes fort naturelles, mais il y a aussi certaines manœuvres artificielles utilisées pour faire l'essai de pneus, qu'il faudra examiner; ce sont les types de déformation statique utilisés pour l'essai de l'élasticité des pneus, le mouvement régulier de roulis dans la «marche de crabe», la propriété d'alignement automatique, et, pour finir, et non le moindre, le mouvement oscillant connu sous le nom de *shimmy* ou dandinement.

La structure et le comportement du pneu sont si complexes qu'on n'est pas encore arrivé à en donner une explication complète et satisfaisante. Les caractéristiques du pneu constituent toujours pour le physicien une mise en demeure d'élaborer une théorie capable de coordonner l'amas de données empiriques et de guider quelque peu le fabricant et l'usager. On a ici une occasion tentante d'appliquer la méthode d'idéalisation, qui est la procédure normale quand on applique les mathématiques au monde physique.

IMPORTANCE DES RÉACTIONS DU SOL

Considérons un véhicule à roues en mouvement accéléré sur une route plane. Seules les forces extérieures peuvent produire une accélération, et, en terrain plat, les seules forces extérieures sont fournies par la route et par la résistance de l'air. On arrivera à la même conclusion si l'on retarde le véhicule ou qu'on fait un virage.

Si l'on considère la roue et le pneu comme un système dynamique fermé on doit y inclure aussi les forces transmises à la roue par l'essieu, le couple moteur, la force de freinage, la force de braquage et l'adhésion de l'enveloppe du pneu à la jante de la roue. Ces forces déterminent le mouvement de la roue et du pneu et le but final de notre recherche est de déterminer la réaction de la roue et du pneu à ces forces en fonction des caractéristiques mesurables du pneu.

CHARGES VERTICALES ET ROULEMENT LIBRE

Les forces qui s'exercent sur un pneu gonflé libre sont simples si l'essieu est soulevé par un cric jusqu'à ce que le pneu se décolle du sol. A la pression de l'air s'opposent les tensions

circonférentielles et transversales (en cerceau) de l'enveloppe et une tension longitudinale du bourrelet (figure 1) qui s'exerce uniformément sur la jante. Mais quand on ôte le cric la charge se met à peser sur l'essieu et la situation devient bien plus compliquée, même si l'on ne tient pas compte des effets de l'écanteur et du pincement.

La pression qui s'exerce verticalement du sol vers le haut écrase le pneu; la charge supportée par la roue est environ égale au produit de la surface de la zone de contact par la pression de gonflage (la différence entre la surpression — indiquée par le vérificateur normal — et la pression atmosphérique). A vrai dire la charge n'est pas transmise par l'air mais bien par des tensions de l'enveloppe du pneu. L'essieu d'une auto est suspendu dans le pneu (figure 2) par une différence analogue entre les tensions transversales des deux moitiés.

L'avantage principal du bandage pneumatique sur le bandage plein est que l'écrasement et la distorsion répartissent la charge sur une surface de contact beaucoup plus étendue; le véhicule peut donc se déplacer en terrain plutôt mou où une roue rigide s'enfoncerait jusqu'à l'essieu. Les pneus peu gonflés rappellent les coussinets qui garnissent les pieds du chameau, lesquels s'étalent lorsque l'animal est chargé à bloc et diminuent la pression de contact d'environ 1200 g/cm². Les pneus sous forte pression comme ceux des avions civils, dont la pression de gonflage peut atteindre 7150 g/cm², ne peuvent être employés que sur des pistes d'atterrissage dures ayant une forte couche de béton sur un sous-sol stabilisé.

Le grand avantage de la roue est la résistance moindre qu'elle suscite du sol lorsqu'elle roule librement, et cet avantage est conservé quand elle est munie d'un pneu gonflé. La résistance de roulement — le quotient de la traînance horizontale D sur la charge verticale W, — varie avec la vitesse de progression, la mollesse du sol et le genre de pneu. Un chiffre représentatif de cette résistance est de 10 kg par tonne soit 1%, pour des vitesses modérées sur route dure.

La traînance horizontale donne un couple par rapport à l'essieu et tend par conséquent à imprimer une accélération angulaire à la roue. Pour contrebalancer cette action il faut que la réaction verticale du sol se déplace en avant sur une distance x depuis le centre de la zone de contact en produisant un couple de ralentissement par rapport à l'essieu, tel que $Wx = Dh$, où h est la distance du sol à l'essieu (figure 3). Ce mouvement du centre de pression provient certainement de l'asymétrie acquise par le pneu en roulant.

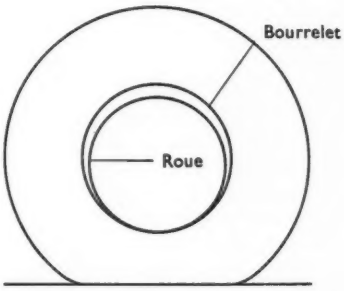


FIGURE 2 – *Illustration de la manière dont le pneu soutient la charge de la roue.*

Un trait avantageux supplémentaire du pneu est «l'amortissement» qu'il produit lorsqu'il surmonte des obstacles et qu'il roule en terrain irrégulier. Pour ainsi dire, le pneu avale l'obstacle: il se déforme de façon telle que l'essieu continue à avancer horizontalement tandis que la roue surmonte l'obstacle. On peut se rendre compte de l'efficacité de l'opération quand on calcule l'accélération verticale produite lorsqu'une roue rigide de rayon R surmonte un obstacle de hauteur h à une vitesse V (figures 4*a* et 4*b*). Il est facile de démontrer que la vitesse et l'accélération verticales dépassent respectivement hV/d et $2hV^2/d^2$, où $d = \sqrt{(2Rh - h^2)}$ est la distance parcourue en avant par la roue tandis qu'elle s'élève par-dessus l'obstacle. L'accélération verticale maximum dépasse donc V^2/R. Pour une roue de 90 cm de diamètre roulant à 50 km à l'heure on obtient un chiffre fantastique de 20 fois l'accélération de la pesanteur.

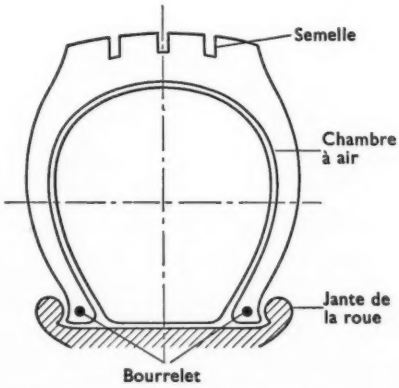


FIGURE 1 – *Section transversale d'un pneu.*

Pour compléter ce bref résumé de la manière dont le pneu soutient des charges verticales, on doit aussi mentionner l'action des pneus d'avion comme amortisseurs de choc lors de l'atterrissage. Leur action vient s'ajouter à celles des amortisseurs hydrauliques des trains d'atterrissage principaux en absorbant l'énergie cinétique de la composante verticale de la vitesse de l'avion atterrissant.

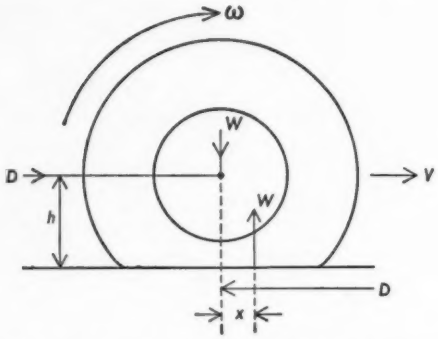


FIGURE 3 – *Forces s'exerçant pendant le roulement libre à la vitesse* V *d'avance uniforme.*

Une singularité intéressante du mouvement de roulement du pneu est le rapport entre le rayon effectif de roulement r et la hauteur de l'essieu au-dessus du sol (figure 5). Par définition le rayon de roulement est le rapport de la vitesse linéaire en avant V de l'essieu à la vitesse angulaire ω de la roue. Des expériences prouvent qu'à faible vitesse le rayon de roulement est inférieur au rayon R du pneu libre, gonflé et non-braqué d'environ un tiers de la déviation δ du pneu. On peut procéder de la façon théorique suivante: soient, dans le schéma, corde $AB = 2R \sin\theta$ (figure 5) et arc $AB = 2R\theta$. Or, $2\theta/\omega = (2R/V) \sin\theta$, et $\delta = R(1 - \cos\theta) \simeq \frac{1}{2}R\theta^2$. Par conséquent nous avons pour le rayon de roulement

$$r = V/\omega = R \sin\theta/\theta \simeq R(1 - \tfrac{1}{6}\theta^2) = R - \tfrac{1}{3}\delta.$$

C'est probablement ce qui explique le fait connu que la précision des observations du compteur de vitesse ne sont pas affectées par des variations de la pression et de la déviation du pneu.

L'effort de compression du pneu est donné par la formule $2R(\theta - \sin\theta)/2R\theta \simeq \frac{1}{6}\theta^2 = \frac{1}{3}\delta/R$, soit le tiers du rapport de la déviation du pneu à son rayon non-braqué. L'expérience confirme ce calcul.

FORCES HORIZONTALES ET FREINAGE

Lorsqu'on applique un couple d'entraînement ou de freinage à une roue, les forces présentes dans

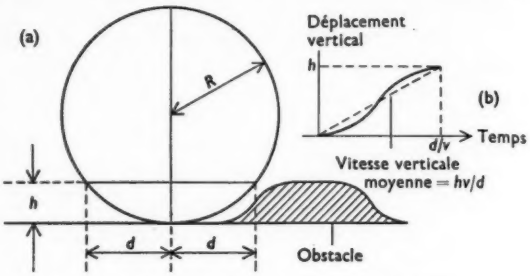


FIGURE 4 – *Roue rigide surmontant un obstacle.*

l'enveloppe du pneu constituent un système fort complexe, mais il y a des formules approchées qui donnent des valeurs empiriques pour la réaction du sol produite. Les données sont rares pour l'entraînement de la roue mais abondantes sur l'action du freinage.

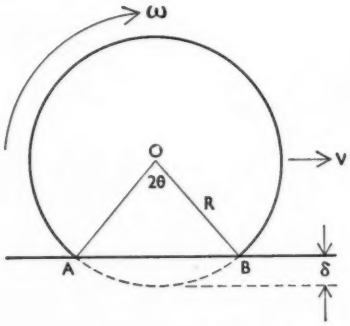


FIGURE 5 – *Rayon de roulement d'un pneu.*

L'effet de freinage maximum est limité par trois conditions: l'adhérence du pneu à la roue, où le bourrelet s'appuie sur la jante; l'effort de cisaillement maximum que l'enveloppe peut supporter sans se déchirer; et l'adhérence du pneu au sol. C'est la dernière condition qui est la plus importante. Elle a pour effet de limiter la force de retardement, qui s'exerce dans la zone de contact, au produit de la charge verticale par le coefficient de frottement du sol. Ce coefficient peut varier énormément, de 1,0 pour des pneus à croissants sur du béton cannelé jusqu'à 0,1, ou moins, pour des pneus lisses sur une piste couverte de glace.

On a le maximum de frottement du sol lorsqu'il y a dérapage sur toute la surface de contact. Ceci a toujours lieu quand un avion atterrit: les roues sont immobiles au début mais le frottement les fait tourner. Dans l'opération, qui ne dure qu'environ un dixième de seconde, la chaleur produite fait fondre une couche mince de caoutchouc du

pneu, une bouffée de fumée s'élève du caoutchouc brûlé, il y a un grincement caractéristique et l'on peut voir sur la piste la tache noire de caoutchouc fondu. Chose étrange, l'usure du pneu est négligeable, et la rotation préalable des roues (avant l'atterrissage) est inutile et serait d'ailleurs fort difficile à réaliser.

Il serait peut-être encore plus intéressant d'étudier le régime de freinage modéré. Ses effets sont faciles à mesurer par le glissement de la roue, c'est-à-dire par le pourcentage de la réduction de la vitesse angulaire par rapport à la valeur propre au roulement libre. L'application du frein imprime un effort de traction et le pneu y est donc soumis avant d'entrer dans la zone de contact. Ceci augmente le rayon effectif de roulement et cet effet persiste jusqu'à ce que le glissement soit numériquement égal à l'effort de compression du pneu en roulement libre dans la zone de contact.

Sous ces conditions il se présentera un frottement limite d'abord à l'arrière de la zone de contact et il s'étendra vers l'avant à mesure que le freinage est accentué. La traînance totale de frottement dans la zone est proportionnelle au glissement jusqu'au moment où l'état de frottement limite est atteint pour la zone tout entière. La traînance de frottement est ensuite plus ou moins constante et égale à la valeur maximum citée plus haut (figure 6).

FORCES LATÉRALES AU COURS DU VIRAGE

On peut le mieux juger les forces horizontales latérales exercées par le sol sur le pneu au cours du virage et des manœuvres analogues en se basant sur la théorie qualitative des caractéristiques du pneu. Cette théorie se concentre sur la ligne centrale qui suit la périphérie de l'enveloppe. Cette ligne équatoriale s'appelle quelquefois la «ligne de semelle». On n'a donc à considérer que de petites déviations latérales de cette ligne de sa position normale dans des pneus libres en marche rectiligne. Pour obtenir une représentation simple des caractéristiques élastiques du pneu on suppose que la ligne de semelle se comporte comme un fil tendu retenu par une force de compensation répartie de façon continue proportionnellement à son déplacement. Son comportement élastique sera alors spécifié par deux paramètres — la force de compensation par unité de longueur par unité de déplacement latéral K, et la tension équivalente dans la ligne de semelle qu'on indique par $K\sigma^2$ pour la simplicité, où σ a les dimensions d'une longueur. Le problème revient à exprimer toutes les propriétés élastiques latérales du pneu au moyen de ces deux paramètres K et σ.

Il se pourrait bien qu'il faille introduire comme troisième paramètre la rigidité flexurale effective de la ligne de semelle: on peut supposer qu'elle résiste à la déformation latérale, non seulement en tant que ressort et fil tendu, mais aussi comme une poutre. On n'a pas encore calculé à fond les conséquences de cette supposition.

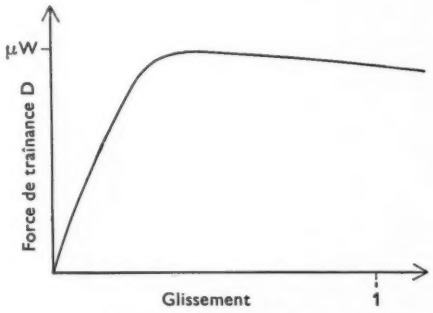


FIGURE 6 – *Variation de la force de traînance* D *d'une roue freinée, en fonction du glissement.* (W = *charge sur la roue,* μ = *coefficient de frottement.*)

Les deux mesures fondamentales des caractéristiques de pneu déterminent l'élasticité latérale et de torsion du pneu chargé quand il repose sur le sol. La roue et le pneu sont maintenus dans un plan vertical au moyen de couples appropriés. Pour mesurer l'élasticité latérale on applique une force horizontale latérale F à l'essieu, tandis qu'une force égale et opposée est fournie par les réactions du sol qui fixent la zone de contact. On trouve que le mouvement latéral de la roue, a, est proportionnel à la force latérale F et le rapport $N = F/a$ est l'élasticité latérale. Dans cet essai la partie inférieure du pneu est déviée latéralement tandis que la roue se déplace par rapport à la zone de contact fixe (figure 7).

Pour mesurer l'élasticité de torsion on applique un couple T par rapport à un axe vertical à la roue, les réactions du sol fournissant un couple égal et de sens opposé. La rotation angulaire α de la roue par rapport à l'axe est proportionnelle au couple T, et le rapport $S = T/\alpha$ est l'élasticité flexurale.

Il est facile d'effectuer ces essais pour des pneus d'auto, mais c'est une opération d'envergure pour les pneus d'avion en raison de leur dimension et des charges élevées auxquelles on doit les soumettre. Les valeurs numériques trouvées pour l'élasticité latérale et de torsion varient du tout au

tout selon les divers types de pneus [1]. Les valeurs théoriques, qui ne dépendent que des paramètres K et σ et de la demi-longueur l de la zone de contact sont

$$\mathcal{N} = 2K(\sigma + l)$$

et

$$S = 2Kl[\tfrac{1}{3}l^2 + \sigma(\sigma + l)].$$

L'ingénieur-mécanicien se soucie moins de ces constantes élastiques fondamentales que du comportement du pneu lorsque la voiture tourne un coin. Dans cette manœuvre le pneu effectue une avance en biais où le plan de la roue forme un angle de lacet θ avec la direction du mouvement de son centre. Les éléments du pneu situés dans la zone de contact adhèrent au sol, de sorte que la portion de la ligne de semelle qui s'y trouve reste parallèle à la direction de mouvement du centre de la roue et que la zone de contact est déplacée latéralement. Il en résulte qu'une force

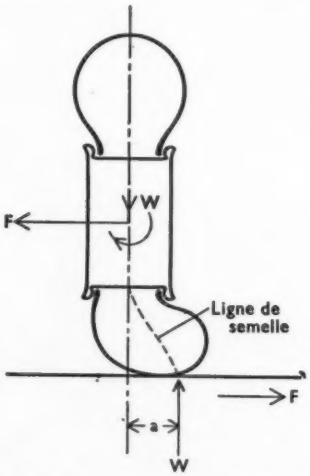


FIGURE 7 – *Illustration du principe de la mesure de l'élasticité latérale, le rapport de la force latérale* F *au mouvement latéral* a *de la roue.*

latérale F s'exerce sur le pneu dans la zone de contact à une distance c en retrait de la verticale passant par le centre de la roue (figures 8 et 9). Le pouvoir de virage F/θ est donné théoriquement (pour de petits angles θ) par

$$F/\theta = 2K(\sigma + l)^2$$

et la chasse pneumatique, c, par

$$c = l[\tfrac{1}{3}l^2 + \sigma l + \sigma^2]/(\sigma + l)^2.$$

C'est la force de virage F qui fournit la force extérieure capable d'imprimer au véhicule l'accélération latérale correspondant à une giration à la vitesse V autour d'un cercle d'un rayon r. Afin d'étudier les caractéristiques d'une auto lors du braquage on doit évidemment envisager les forces de virage s'exerçant sur les quatre roues, ainsi que le roulis du chassis sur les ressorts.

Il y a encore un autre genre de mouvement de la roue et du pneu qui est très curieux et qui est intéressant par les renseignements qu'il apporte sur le paramètre de pneu σ. Dans ce genre de mouvement la configuration initiale est la même que pour la détermination de l'élasticité latérale: la force latérale et le couple appropriés sont

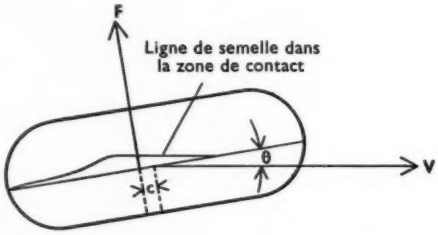


FIGURE 8 – *Force latérale,* F, *dans la «marche de crabe» lors d'un virage d'angle* θ.

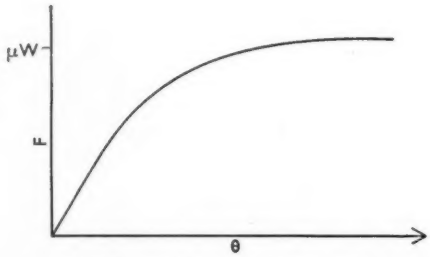


FIGURE 9 – *Variation de la force latérale* F *en fonction de l'angle de lacet* θ *lors d'un virage.*

appliqués à la roue chargée, la forçant ainsi à se déplacer latéralement tandis que la zone de contact est maintenue en position par adhérence au sol. On oblige ensuite la roue à avancer dans son propre plan vertical. On s'aperçoit alors que la zone de contact du pneu se déplace peu à peu latéralement (et en avant) jusqu'à ce qu'elle tombe sous le centre de la roue. La trajectoire de la ligne de semelle sur le sol est une courbe exponentielle de décroissance dont l'équation a la forme

$$g = g_0 e^{-x/\sigma}$$

où g est l'écartement de la ligne de semelle finale, de sorte que la sous-tangente a une longueur constante identique au paramètre de pneu σ, et on l'appelle à juste titre la longueur de détente.

Cet effet étrange, observé pour la première fois par Kantrowitz, est facile à incorporer dans la théorie élémentaire de la ligne de semelle que nous venons de décrire. La mesure directe de la longueur de détente (qui est généralement du même ordre que le rayon du pneu) est certainement très précieuse pour la valeur de σ qu'elle donne, puisqu'on peut s'en servir pour vérifier les valeurs théoriques de l'élasticité tant latérale que de torsion.

LE BALLOTTEMENT OU SHIMMY

Le comportement du pneu réserve constamment des surprises; celle que nous allons décrire est la tendance du pneu à engendrer des oscillations spontanées où la roue se balance de part et d'autre d'un diamètre vertical. Ce genre d'instabilité ne se manifeste généralement qu'à des vitesses élevées, elle est bien connue des motocyclistes et automobilistes de course.

Dans le cas des autos on pense que le ballottement provient de l'accouplement du flottement de la roue avec la vibration de la voiture, c'est-à-dire entre les oscillations des roues autour des chevilles maîtresses et le roulis ou l'oscillation de lacet de la carrosserie. Dans le cas des avions l'oscillation du fuselage semble de peu d'importance; le facteur principal serait l'action réciproque de l'oscillation et de la distorsion du pneu.

La façon la plus simple d'envisager le shimmy dans le cas de roues d'avion est de souligner la différence entre les forces latérales s'exerçant sur le pneu quand la roue est stable et pendant l'oscillation: dans le premier cas elle est inclinée à un angle fixe avec la direction de son avance, dans l'autre elle se balance d'un côté à l'autre. Dans l'oscillation la force latérale n'est plus en phase avec le déplacement angulaire de la roue, elle retarde sur lui. Ceci provient surtout du fait que les changements de position de la zone de contact ne sont pas instantanés mais s'effectuent par l'entrée de nouveaux éléments de caoutchouc dans la partie antérieure de la zone; ces changements se propagent dans la zone à la même vitesse que la roue.

Un retard dans la force de compensation d'un ressort équivaut à peu près à l'addition d'un amortissement négatif, qui engendre naturellement une oscillation négative; c'est là un fait bien connu. Lorsque l'amplitude de l'oscillation devient si grande que le pneu glisse à la fin de chaque battement, un régime d'oscillations constantes s'établit. On ne peut plus diriger le véhicule et la violence des vibrations risque de provoquer des dégâts de structure. Le remède le plus simple est d'apporter à la suspension de la roue ou du pneu juste assez d'amortissement de torsion pour supprimer le shimmy, sans gêner le pouvoir de virage et de chasse.

Le shimmy des roues à pneus est analogue au ballottement plus connu des roues à bandages pleins des chariots à bagages et des tables à thé roulantes. Le shimmy de ces véhicules provient généralement du jeu des roues mal fixées sur l'essieu. Ce jeu permet à la roue de glisser latéralement sur l'essieu et il s'ensuit un certain retard dans la croissance de la force latérale appliquée par le frottement du sol à la roue. De petites oscillations peuvent devenir persistantes et leur amplitude est subordonnée à l'ampleur du jeu de la roue sur l'essieu.

La genèse du shimmy dépend de maints facteurs et la théorie complète en est extrêmement compliquée.

CONCLUSION

Cet article ne fait qu'esquisser de simples faits relatifs à la dynamique du pneu mais on peut déjà se rendre compte de l'importance pratique que ce sujet présente pour l'automobiliste et le pilote d'avion, sans compter l'intérêt intrinsèque considérable qu'il revêt pour le mathématicien. Le comportement du pneu présente bien des facettes inattendues et l'analyse de ses caractéristiques est un champ passionnant pour le théoricien.

Pour plus d'information, nous renvoyons le lecteur au rapport de Hadekel [1], aux publications du *Road Research Laboratory* du *Department of Scientific and Industrial Research*, et de la *Society of Automotive Engineers*.

BIBLIOGRAPHIE

[1] HADEKEL, R. «Aeronautical Research Council Report No. 15 888», novembre 1952.

La chambre à bulles

par C. DODD

Les machines modernes sont capables d'émettre des flux de particules à haute énergie à quelques secondes d'intervalle, c'est-à-dire bien plus rapidement que ne pouvaient enregistrer les détecteurs utilisés jusqu'à présent. L'une des caractéristiques principales des chambres à bulles est de pouvoir s'adapter à la cadence des nouveaux accélérateurs de particules. Ils possèdent d'autres caractères importants: ils n'ont pas de fond de trajectoires parasites, et, en raison de la haute densité du milieu, il y a de fortes chances pour qu'une collision soit enregistrée.

Les progrès de la physique nucléaire des hautes énergies sont en grande partie liés à l'existence de détecteurs de particules et en particulier de détecteurs permettant l'enregistrement photographique des trajets de particules à haute énergie et des fragments provenant de leur collision avec d'autres noyaux. La chambre à détente de Wilson, qui utilise un milieu gazeux et l'émulsion photographique avec milieu solide, sont des exemples désormais bien connus de détecteurs de ce genre. Les circonstances rendant nécessaire un détecteur de type nouveau furent la découverte de deux groupes de particules, les hypérons et les mésons κ [1] au cours des expériences sur les rayons cosmiques. La rareté de ces particules dans les sources naturelles nécessita l'invention d'accélérateurs d'énergie bien plus élevée qu'avant et capables de les émettre en très grosses quantités. Il devint alors évident qu'à l'exclusion de toute autre considération, aucun des détecteurs alors en usage ne pouvait suivre le débit accru de ces machines et qu'un détecteur utilisant un milieu liquide serait mieux adapté.

La chambre à détente utilise le fait qu'un liquide peut se condenser sur les ions produits dans un gaz venant de subir une détente adiabatique. Le trajet matérialisé par les gouttelettes liquides est photographié dès qu'elles sont assez grosses, mais pendant leur croissance il peut se déformer sous l'effet des remous occasionnés dans le gaz par la détente. C'est pourquoi la photographie ne donne pas une image fidèle de la trajectoire de la particule. La densité du gaz, en comparaison de celle d'un liquide ou d'un solide, est faible, et il y a peu de chance qu'une particule subisse une collision avec production de particules nouvelles; il doit en outre s'écouler dix secondes avant la détente suivante du gaz permettant une nouvelle photographie. On peut accroître les chances de collision dans la chambre en y insérant des plaques de plomb mais alors la longueur du trajet devient incertaine et les détails de la collision sont perdus dans les plaques. On peut résoudre ce problème en augmentant la densité du gaz jusqu'au voisinage de 100 atmosphères, mais ceci a l'inconvénient de porter la durée du cycle aux environs de 15 minutes. Etant donné que les machines modernes sont capables de produire des flux de particules à quelques secondes d'intervalle, la chambre à détente ne peut utiliser ce débit dans sa totalité, sinon à très grands frais. La chambre à détente à diffusion à haute pression a une sensibilité continue mais la couche où les trajets peuvent se révéler est de trop faible étendue pour mettre en évidence les détails d'un processus de collision à trois dimensions.

Dans l'émulsion photographique la densité du milieu est suffisante pour assurer des collisions nucléaires en grand nombre, mais les plaques étant sensibles aux rayonnements dispersés, depuis leur fabrication jusqu'au moment du développement, il y a un fond de trajectoires parasites qui empêche de distinguer avec précision les événements qui ont des rapports mutuels. De plus, chaque trajectoire subit des déviations par diffusion multiple de la particule par les atomes lourds composant l'émulsion: il est par suite impossible d'utiliser l'effet d'un champ magnétique comme on le fait dans la chambre à détente, pour déterminer la quantité de mouvement de la particule.

Le fonctionnement de la chambre à bulles dépend du fait que lorsque la pression extérieure exercée sur un liquide est ramenée brusquement à une valeur très inférieure à la tension saturante du liquide à la température de l'expérience, il ne se produit pas d'ébullition avant qu'un certain temps ne se soit écoulé. Dans cet intervalle le liquide est en surchauffe et dans un état d'équilibre instable dont la perturbation aboutit à la formation violente de bulles abondantes qui grossissent

vite. Ce retard à l'ébullition véritable tient au fait que les forces de tension superficielle s'exerçant sur une bulle microscopique au sein du liquide tendent à l'écraser alors que la tension de vapeur interne tend à la gonfler. L'effet de la tension superficielle décroît à mesure que les dimensions s'accroissent: si la bulle dépasse un certain volume, l'effet global est un effet d'expansion qui lui fait atteindre très vite des dimensions visibles. Le retard correspond donc au temps nécessaire aux fluctuations thermiques désordonnées pour produire au sein du liquide une bulle assez grosse pour permettre cette croissance. Dans un récipient à parois lisses ce délai peut être de plusieurs secondes [2].

Une particule ionisante qui traverse un liquide suffisamment surchauffé en détruit immédiatement l'équilibre instable et provoque l'ébullition le long de son trajet [3]; en se servant de la photographie rapide, on peut suivre la vitesse de croissance du chapelet de bulles marquant la trajectoire de la particule ionisante. Celle-ci donne naissance, sur son passage dans le liquide, à des ions chargés; il est probable que cette énergie électrique réapparaît sous forme d'énergie thermique qui élève la température du liquide au voisinage du parcours. Il en résulte une diminution de la tension superficielle qui tend à écraser toutes les plus petites bulles aux alentours, alors que la tension de vapeur interne s'accroît, si bien que même la plus infime des bulles formées spontanément se met à grossir de façon illimitée.

Si le liquide est contenu dans un récipient métallique muni de fenêtres à vitres plates, l'ébullition commence toujours à la jonction du métal et du verre dès que l'on réduit la pression extérieure sur le liquide. Si cependant cette réduction de pression s'effectue très rapidement, la pression interne en des points du liquide éloignés des parois descend assez bas pendant un centième de seconde environ. Pendant ce laps de temps le liquide se trouve dans un état de surchauffe dont l'équilibre est immédiatement détruit par le passage de la particule ionisante [4].

La plupart des chambres à bulles actuelles sont conçues sur ce modèle; elles se composent principalement d'un récipient métallique à parois épaisses munies de deux vitres plates; le liquide y est maintenu à une température constante très supérieure à son point d'ébullition normal (figure 2). On exerce par de l'air comprimé une pression suffisante pour empêcher l'ébullition au moyen d'un piston ou d'un diaphragme flexible en contact avec le liquide. Pour rendre la chambre sensible on laisse l'air s'échapper par une valve à fonctionnement rapide. Le faisceau de particules ionisantes provenant de l'accélérateur est alors envoyé dans la chambre et au bout de quelques millièmes de secondes, temps pendant lequel les bulles échelonnées le long du parcours ont pu atteindre un diamètre d'environ 30 μ, on photographie la trajectoire par un éclair intense mais de courte durée. On peut comprimer de nouveau la chambre qui est prête en quelques secondes ou même une fraction de seconde pour la détente suivante: il est donc possible d'utiliser chaque bouffée de l'accélérateur et d'obtenir plusieurs milliers de clichés en un seul jour. Il y a de grandes chances pour qu'une fraction importante de ces clichés soit utilisable pour l'étude des collisions nucléaires et de la production des particules nouvelles; en effet, la probabilité de collision avec la particule qui arrive est élevée en raison de la densité relativement forte du milieu liquide. Une chambre à bulles longue de 10 cm peut fournir autant de collisions qu'une chambre de Wilson de 40 m et plus.

En outre, les trajectoires qui se forment dans la chambre à bulles ne subissent pas de distorsion due aux mouvements du milieu, comme dans la chambre à détente; en effet, le cliché n'est pris que quelques millièmes de seconde après la formation des bulles et l'inertie du liquide est telle qu'on peut tenir pour négligeable sa mobilité dans un laps de temps aussi bref. Un autre avantage majeur de la chambre à bulles, l'absence du fond de trajectoires parasites, provient du fait que l'enregistrement des trajectoires ne s'accomplit que pendant le temps très bref (moins d'un centième de seconde) où le liquide est en état de surchauffe. Il en résulte que l'interprétation sur un cliché de chambre à bulles d'un événement complexe est une opération plus sûre que dans une émulsion photographique.

La vitesse d'une particule peut se déduire du nombre de bulles formées par unité de longueur du trajet, procédé semblable au dénombrement des gouttelettes dans la chambre à détente ou des grains dans les émulsions.

Tous les liquides essayés jusqu'à présent se sont révélés utilisables dans les chambres à bulles mais comme la construction d'une chambre assez résistante pour supporter des pressions très supérieures à 30 atmosphères présente des difficultés, on doit éviter l'emploi des liquides nécessitant de hautes pressions. La pression de fonctionnement étant en gros les deux tiers de la pression critique, les liquides qui, comme l'eau, ont une pression critique élevée ne conviennent pas. Le propane,

FIGURE 1 – *Photographie de trajectoires électroniques dans une chambre à bulles à hydrogène liquide. L'application d'un champ magnétique intense impose aux électrons des trajectoires en hélices à gauche, dont la courbure s'accentue à mesure que l'électron est ralenti par le liquide. (Photographie reproduite grâce à l'amabilité du Professeur Luis Alvarez.)*

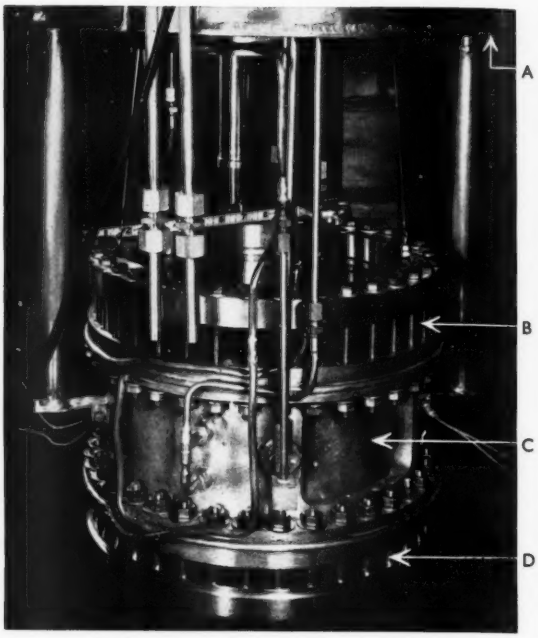


FIGURE 2 – *Chambre à bulles à hydrogène liquide de 25 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur; les fenêtres de verre ont 5 cm d'épaisseur. Pour fonctionner, la chambre doit être placée à l'intérieur d'un réservoir où l'on a fait le vide. A: bain d'hydrogène liquide. B: fenêtre en verre. C: chambre en acier inoxydable contenant de l'hydrogène liquide. D: fenêtre en verre. (Photographie reproduite grâce à l'amabilité du Professeur Luis Alvarez.)*

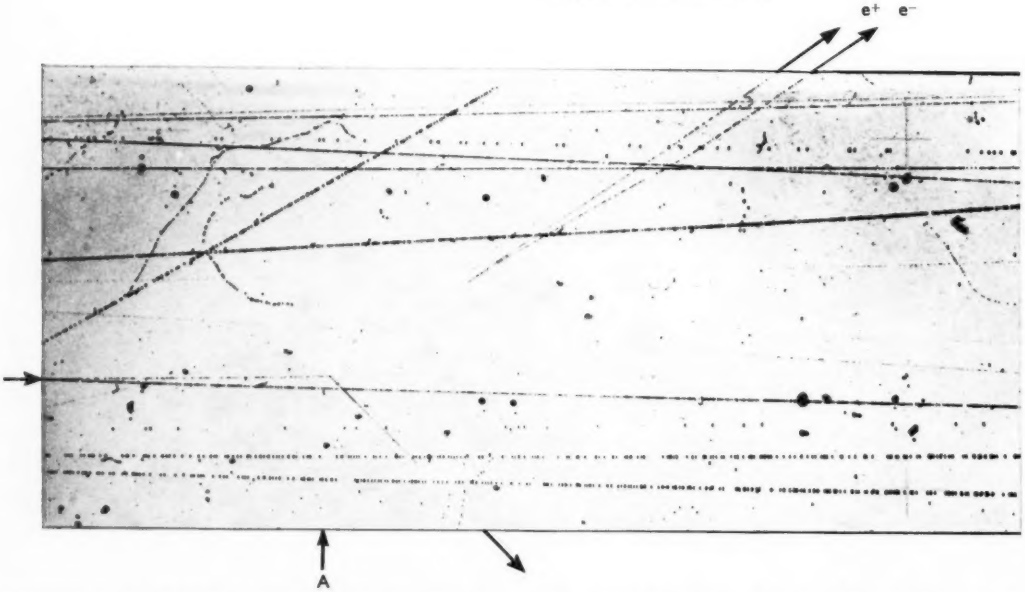


FIGURE 3 – *Photographie caractéristique obtenue avec une chambre à bulles au propane liquide exposée au faisceau de 2 GeV. Le faisceau traverse la chambre (15 cm) sans collision. En A, un méson π incident rencontre un proton, avec production d'un rayon γ dont on peut déterminer la direction à partir des trajectoires des paires d'ions de charge opposée qu'il produit. (Photographie reproduite grâce à l'amabilité du Professeur D. A. Glaser.)*

le xénon et l'hydrogène sont ceux dont l'usage est le plus courant. L'hydrogène liquide est sans aucun doute le milieu idéal étant donné que tous ses noyaux sont des protons: il est possible d'interpréter les processus de collision provenant de son bombardement au moyen d'autres particules produites par des machines avec moins d'ambiguïté que les collisions survenant dans tout autre liquide. Il reste pourtant que les difficultés expérimentales sont énormes vu que la température de fonctionnement est voisine de 27°K et la pression d'environ 6 atmosphères. Malgré tout, il existe à l'Université de Californie une chambre de 25 cm de diamètre et 15 cm de profondeur qui fonctionne avec succès depuis quelque temps déjà dans le faisceau de 6,3 GeV du Bevatron, dans un puissant champ magnétique qui permet de déduire les quantités de mouvement des particules de la courbure qu'impose le champ aux trajectoires (figure 1).

Dans les laboratoires où l'on ne dispose pas d'hydrogène liquide en quantité suffisante, on se sert en général de propane liquide, en raison de son prix assez bas, de la commodité de sa température de fonctionnement (60° environ) et du fait qu'il ne contient que deux types d'atomes relativement légers, le carbone et l'hydrogène (figure 3). Le xénon présente un certain attrait car sa densité (2,3 g/cm^3) est voisine de celle d'une émulsion nucléaire. On a ainsi les avantages de cette dernière technique sans ses inconvénients. C'est un produit très coûteux, mais une fois remplie, la chambre peut être utilisée pour un nombre illimité de clichés sans dommage pour le liquide. Il peut ainsi faire le travail de milliers de paquets d'émulsions qui coûtent cher à fabriquer et à révéler après l'exposition.

Les dimensions physiques d'une chambre à bulles dépendent bien entendu de l'usage qu'on veut en faire. On espère avant tout acquérir de nouvelles notions sur les propriétés des particules récemment découvertes par une étude détaillée des réactions telles que $\pi + P \rightarrow \Lambda^\circ + \theta$.

Leur présence et leur direction sont toutefois révélées par les traces des couples de particules chargées en lesquelles elles se désintègrent rapidement. Pour que ces trajectoires doubles se terminent à l'intérieur du liquide, il est nécessaire que les dimensions latérales de la chambre soient d'environ 15 cm pour le propane et 50 cm pour l'hydrogène; la dimension le long de la direction du faisceau doit être au moins le double de la largeur. Une chambre à propane remplissant ces conditions est à peine plus coûteuse qu'une chambre à détente ordinaire de dimensions comparables. La réalisation d'une chambre à hydrogène possédant les dimensions citées dépasse les possibilités financières de la plupart des laboratoires mais de grands progrès sont en cours dans ce domaine. Il existe un compromis beaucoup moins onéreux: on utilise une chambre a bulles à hydrogène beaucoup plus petite pour produire et identifier l'événement; et d'autres chambres à côté pour arrêter les produits à longue portée.

L'analyse des résultats fournis par des chambres de Wilson ou des émulsions est une opération lente et pénible. Il faut beaucoup de temps et d'habileté pour démêler les événements présentant un intérêt réel du fond de trajectoires parasites, puis effectuer les mesures variées permettant d'attribuer vitesses, charges et quantités de mouvement à chacune des particules entrées en jeu. Même avant l'existence de la chambre à bulles on se trouvait devant une situation peu satisfaisante, les données s'accumulant beaucoup plus vite qu'on ne pouvait les analyser. Avec les techniques actuelles, l'analyse des clichés produits en un jour par une chambre à bulles fonctionnant dans le faisceau d'un accélérateur à pulsations, demanderait plus d'un an. Une nouvelle technique d'analyse utilisant des calculateurs électroniques est donc essentielle.

On vient de mettre au point la technique suivante: au lieu de reprojeter les deux vues stéréoscopiques des trajectoires des bulles pour reconstituer la trajectoire spatiale réelle de la particule, on en projette des images agrandies côte à côte sur un écran. Il suffit d'un opérateur relativement peu entraîné pour actionner un mécanisme qui déplace sur l'écran un réticule dont le centre suit chaque trajectoire l'une après l'autre. Les deux coordonnées des images individuelles sur chacune des photographies stéréoscopiques sont enregistrées sur une bande, qui passe ensuite dans un calculateur électronique. Avec ces indications, cette machine donne pour tout point de la trajectoire les trois coordonnées réelles et la quantité de mouvement, et la courbe passant par ces points. Avec cette technique, il suffira d'une minute pour analyser une trajectoire.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Massey, H. S. W. *Endeavour*, **15**, 117, 1956.
[2] Dodd, C. *Proc. phys. Soc.*, *B*, **68**, 686, 1955.
[3] Glaser, D. A. *Phys. Rev.*, **87**, 665, 1952.
[4] Glaser, D. A. et Rahm, D. C. *Ibid.*, **97**, 474, 1955.

La cuticule des plantes fossiles

par T. M. HARRIS

Les cuticules des plantes fossiles présentent un intérêt exceptionnel, elles ont, en effet, une grande stabilité chimique et ne sont donc pas un matériel fossile au sens habituel, mais la cuticule réelle telle qu'elle était sur la plante il y a des millions d'années. Ce fait est connu depuis plus d'un siècle, mais ce n'est qu'assez récemment qu'on s'est mis à l'utiliser pratiquement, par exemple pour l'identification des espèces végétales fossiles.

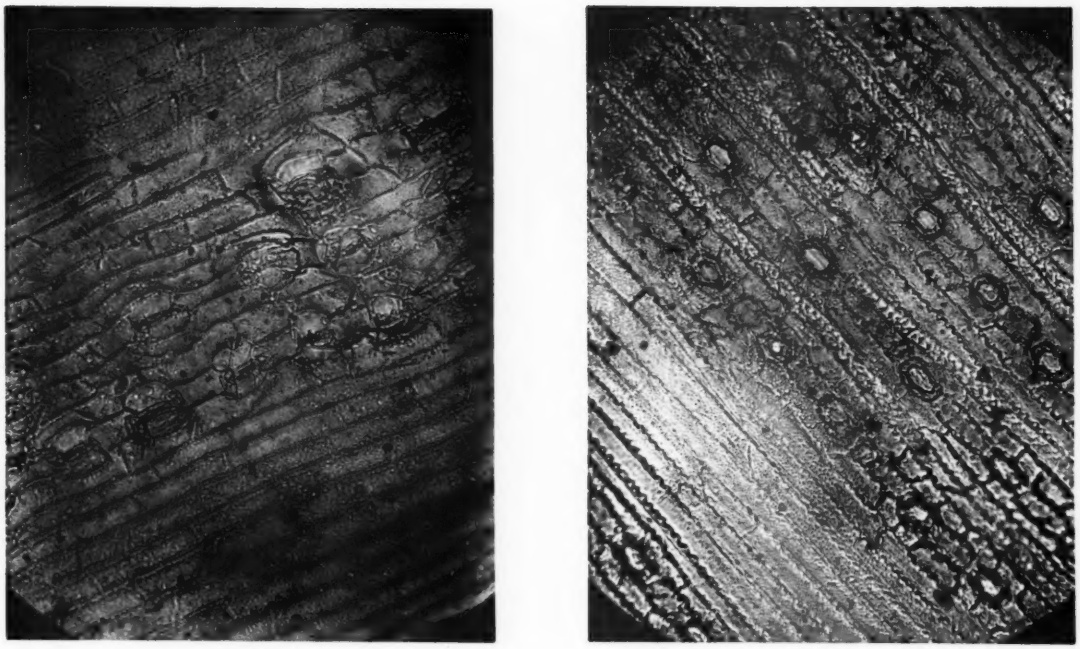
Les parois cellulaires des plantes terrestres contiennent beaucoup de matériaux en plus de la cellulose. Parmi ceux-ci, la cutine forme une membrane résistante à l'extérieur de l'épiderme. La cutine n'existe pas dans le bourgeon, mais apparaît au cours de la croissance de la feuille et peut s'épaissir lentement au cours de la vie de celle-ci. La cutine a des analogies avec la cire; elle est imperméable à l'eau, et contribue donc à l'économie de l'eau en milieu sec. Comme la cire, elle absorbe aisément des colorants tels que le Soudan III, ce qui permet de la distinguer sur les coupes. La stabilité chimique de la cutine est remarquable et ceci a des conséquences importantes. Dans la plante vivante elle forme un film protecteur qu'aucun organisme ne peut facilement attaquer; dans les plantes fossiles la cuticule persiste inchangée après des millions d'années et reste donc utilisable pour les paléobotanistes. On a retrouvé des cuticules de plantes parmi les plus anciennes (Dévonien). Enfin, la grande stabilité chimique de la cuticule rend son isolement aux fins d'examen facile, car il suffit de soumettre le matériel fossile à un traitement chimique assez violent pour dissoudre tout le reste.

Malgré sa stabilité, la cutine ne résiste pas parfaitement à tous les mécanismes destructeurs naturels et certaines bactéries arrivent à détruire les cuticules des feuilles mortes; mais il s'agit en ces cas d'un mécanisme aérobie. Or habituellement les feuilles qui se fossilisent sont celles qui tombent dans les rivières et sont ensevelies dans la vase dans des conditions anaérobies: dans de telles conditions la cuticule restera intacte indéfiniment. Cependant, comme tous les matériaux organiques elle peut se trouver détruite par les forces naturelles les plus violentes comme les hautes pressions et les températures élevées; toutes les plantes fossiles ne possèdent donc pas une cuticule intacte.

Pour notre propos actuel, nous n'avons à envisager que les principes généraux de la méthode d'isolement que l'on utilise communément au laboratoire. On place le matériel fossile, du charbon par exemple, dans un mélange d'acide nitrique et de chlorate de potassium pendant quelques heures; sa couleur passe alors graduellement du noir au brun. On rince alors le matériel et on le passe dans l'ammoniaque où les matières brunes se dissolvent pour donner une solution noire, la cuticule restant intacte sous forme d'une membrane transparente.

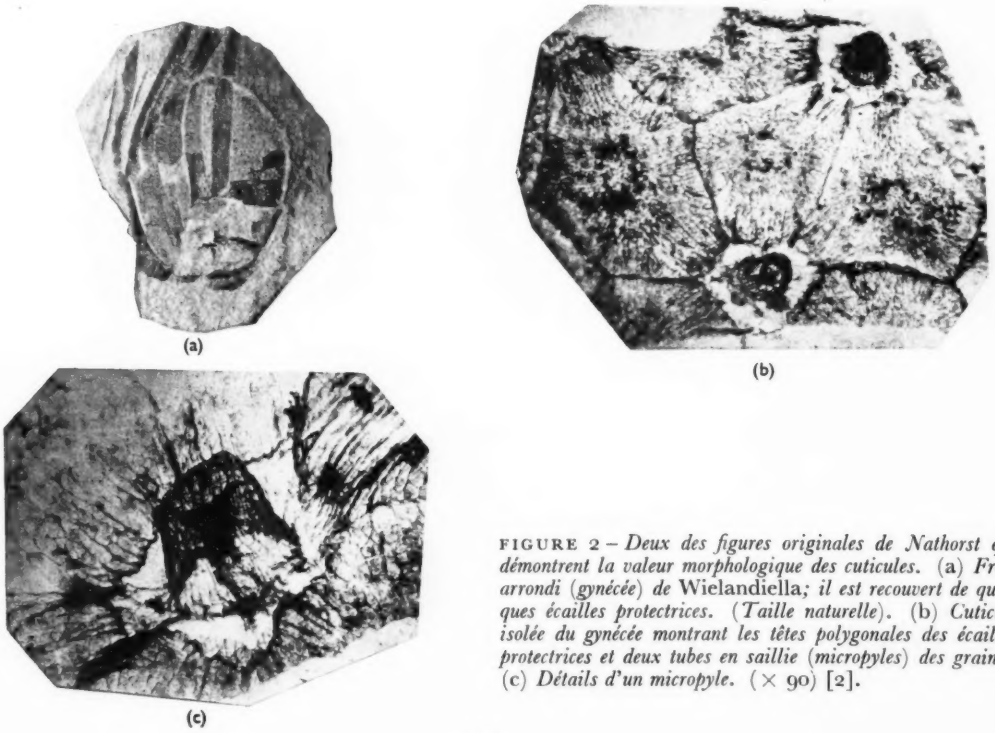
Dans une feuille, comme une aiguille de pin, la cuticule forme une mince membrane tout autour de l'épiderme et imprègne la cellulose dans les couches profondes de la paroi de la cellule épidermique. Quand on isole cette cuticule par un procédé du type que l'on vient de décrire et qu'on l'étend sur une lame microscopique, on peut voir le contour extérieur de chaque cellule épidermique représenté par un anneau. En particulier, les stomates apparaissent nettement délimités. La cuticule ne nous fournit donc pas que ses propres caractères distinctifs, mais représente aussi une partie importante de la structure de l'épiderme sous-jacent et son étude minutieuse peut être instructive au plus haut point. Ainsi il est souvent possible de reconnaître les caractères de la famille, par la disposition des cellules autour des stomates, les caractères du genre par le mode de groupement des stomates, et les caractères spécifiques à certains détails de la forme cellulaire. On peut aussi parfois déduire de cette étude les conditions dans lesquelles s'est faite la croissance de la plante. Les conditions défavorables du milieu donnent des feuilles plus petites bien que possédant un nombre à peu près normal de cellules, chacune de celles-ci étant alors plus petite.

De plus, la cuticule peut nous aider à résoudre un des problèmes les plus irritants de la paléobotanique, résultant du fait qu'un fossile particulier ne représente le plus souvent qu'un petit fragment de la plante d'origine. Ainsi, faute d'indices



(a) (b)

FIGURE 1 – *Cuticules isolées vues de face et montrant les stomates de deux conifères.* (a) *Cèdre du Liban,* C. libani. (b) *Pin,* Pinus palustris. (× 200)



(a) (b) (c)

FIGURE 2 – *Deux des figures originales de Nathorst qui démontrent la valeur morphologique des cuticules.* (a) *Fruit arrondi (gynécée) de* Wielandiella*; il est recouvert de quelques écailles protectrices. (Taille naturelle).* (b) *Cuticule isolée du gynécée montrant les têtes polygonales des écailles protectrices et deux tubes en saillie (micropyles) des graines.* (c) *Détails d'un micropyle.* (× 90) [2].

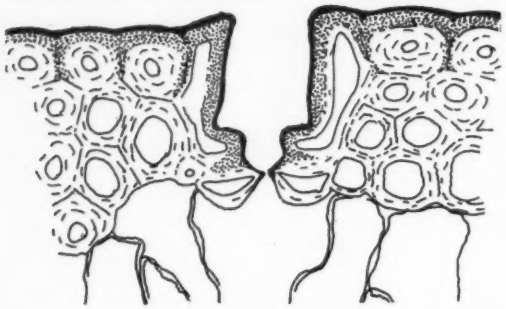


FIGURE 3 – *Coupe à travers un épiderme de pin sylvestre,* Pinus sylvestris, *montrant un stomate au fond d'une cavité profonde. Les couches fortement cutinisées sont représentées en noir et les couches faiblement cutinisées en pointillé.* (× 450)

permettant de les relier entre eux, attribue-t-on souvent les restes fossiles des différents organes d'une seule espèce à des espèces différentes. Parfois la cuticule de la feuille peut fournir le trait commun, une de ses caractéristiques, par exemple un type particulier de poil, pouvant se retrouver sur différents organes de la même plante. De plus, les feuilles qui sont les fossiles végétaux les plus communs sont souvent difficiles à attribuer à une espèce définie, car il peut y avoir beaucoup de variations entre les feuilles d'un même arbre alors qu'il n'y a souvent aucune différence évidente entre les feuilles de deux espèces d'arbres tout à fait distinctes. Pourtant, la structure microscopique de la cuticule de la feuille peut être tout à fait spécifique. L'identification précise de feuilles fossiles est importante non seulement pour le botaniste mais aussi pour le géologue car ce dernier s'en sert beaucoup pour l'identification des roches.

Un exemple intéressant de l'importance de la cuticule pour l'identification de l'espèce nous est fourni par certains fossiles végétaux des couches jurassiques du Yorkshire. Hamshaw Thomas a reconnu les fruits de deux espèces distinctes de plantes dans la Couche de Gristhorpe près de Scarborough et fait remarquer qu'il devait exister deux sortes de feuilles correspondantes. Mais l'examen des feuilles attribuées à *Sagenopteris phillipsi* semblait montrer une variation continue de la forme et empêchait ainsi la répartition dans les deux groupes attendus. Cependant l'examen d'un grand nombre d'échantillons de cuticule a montré immédiatement qu'elles appartiennent à deux groupes bien définis. L'un possède des parois cellulaires rectilignes, l'autre les a sinueuses. Un nouvel examen des feuilles à la lumière de cette information a montré que celles du premier groupe avaient en moyenne des dents beaucoup plus larges que celles des feuilles de l'autre groupe. Ainsi la question se trouvait résolue d'une manière non équivoque: l'identification des deux espèces de fruits se révélait correcte grâce à l'identification des deux sortes de feuilles correspondantes.

Le problème inverse peut aussi se poser. Une seule plante peut posséder des feuilles si variées que des travailleurs différents qui n'ont disposé chacun que d'un petit nombre d'échantillons les ont attribuées à des espèces différentes. La littérature s'alourdit alors de plusieurs noms qui se rapportent en fait à une seule espèce et ceci vient embrouiller les éléments d'identification basés sur des organes moins variables, comme ceux de la reproduction. L'identification spécifique des feuilles fossiles de ce type comporte toujours une certaine part d'appréciation personnelle, mais le fait que leurs cuticules soient uniformes renforce beaucoup l'hypothèse de leur inclusion dans une seule espèce.

Les preuves supplémentaires fournies par la cuticule sont particulièrement précieuses quand il s'agit de petites feuilles dont les formes ont souvent peu de valeur pour l'identification. Ainsi les Conifères ont de petites feuilles et l'attribution de

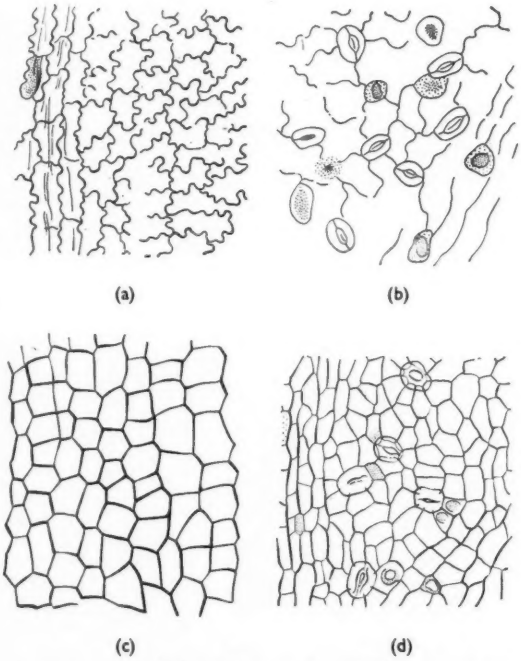


FIGURE 4 – *Cuticules de deux espèces de* Sagenopteris *du Yorkshire.* (a), (b) *Cuticules supérieure et inférieure de* Sagenopteris colpodes. (c), (d) *cuticules supérieure et inférieure de* Sagenopteris phillipsi. (× 150)

leurs restes fossiles à des groupes définis se trouvait jusqu'à ces dernières années dans un état de confusion inextricable. Pourtant, l'étude de leurs cuticules très développées a complètement changé la situation et les Conifères fossiles constituent maintenant, au point de vue de la classification, un groupe bien défini et d'un très grand usage pour dater les autres restes.

Un exemple de ce fait nous est fourni par certaines carrières carbonifères du Sud du Pays de Galles dans lesquelles on trouve occasionnellement des fissures remplies de matériaux blocailleux — manifestement d'origine postérieure — contenant des ossements qui représentent une faune intéressante de petits animaux terrestres. Tout ce qu'on pouvait dire de l'âge de ces restes animaux était qu'ils présentaient des affinités avec ceux du Mésozoïque ancien et qu'ils étaient plus anciens que ceux d'un étage du Lias inférieur où la mer a recouvert la localité et scellé le gisement. Par dissolution de certains blocs dans l'acide chlorhydrique on a obtenu quelques feuilles de conifères minuscules; elles avaient seulement un ou deux millimètres de diamètre et n'étaient pas beaucoup plus longues. Cependant, après une préparation appropriée, leur cuticule a montré une structure clairement définie qui correspond d'une manière précise à l'espèce *Cheirolepis muensteri* que l'on trouve abondamment dans les roches rhéto-liassiques de l'Allemagne du Sud-Ouest, mais pas, jusqu'à présent, en dehors de cette région ou de cette période géologique assez courte. Ceci constitue donc une indication très utile de l'âge des restes animaux en question.

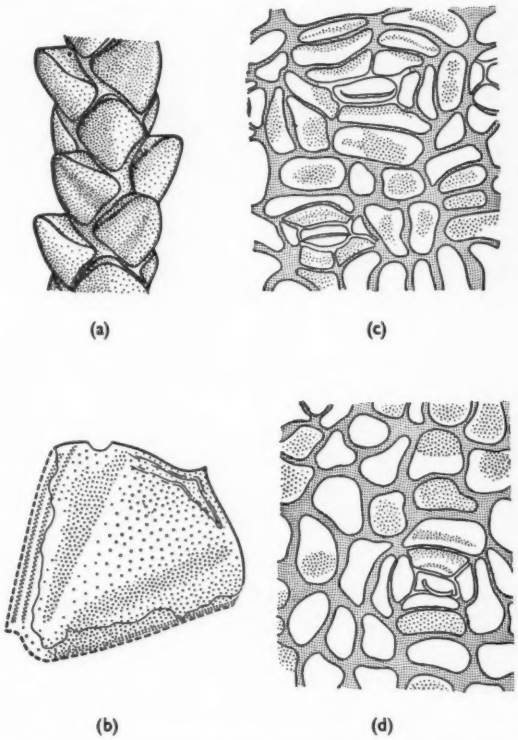


FIGURE 5 – Brachyphyllum mamillare *et* Araucarites phillipsi. (a) *Petit fragment de rameau de* B. mamillare *en reconstitution* (× 3). (b) *Ecaille isolée de* A. phillipsi (× 2). (c) *Cuticule de l'extrémité pointue de* A. phillipsi (× 400). (d) *Cuticule de la feuille de* B. mamillare (× 300). [3].

Interprétées prudemment, les cuticules des plantes fossiles peuvent nous fournir des indications utiles sur les conditions climatiques qui régnaient au moment où la plante vivait. Une bonne partie des feuilles fossiles ont des cuticules épaisses et des stomates profondément enfoncés, présentant souvent une protection supplémentaire sous forme de boutons, de plis de la surface foliaire et de poils. Une telle organisation donne à penser qu'elle diminue la perte d'eau par évaporation et il est certainement vrai que, dans les plantes actuelles, de tels caractères «xéromorphes» se rencontrent plus fréquemment chez les plantes poussant sous des climats où sévissent fréquemment de fortes sécheresses que chez les plantes rencontrées sous les climats doux d'une manière permanente. Il existe donc une certaine corrélation entre la forme xéromorphe et un climat sec. Pourtant, malgré ses premières publications [1], l'auteur pense que, si les déductions tirées de considérations de ce genre sont légitimes, elles restent néanmoins conjecturales.

Les morphologistes peuvent obtenir beaucoup d'informations utiles par l'étude des cuticules. Les botanistes voudraient comprendre l'organisation de chaque organe végétal et on a mis au point pour les plantes actuelles des méthodes satisfaisantes. Mais le microtome et tout ce qu'il implique n'est guère applicable à un fruit fossile réduit à une pellicule de charbon. Ici la cuticule présente une très grande valeur puisqu'elle permet l'examen microscopique des surfaces épidermiques. Le premier succès remarquable obtenu dans cette voie l'a été avec le gynécée (organe producteur de la graine) de certaines Bennettitales. Ces dernières constituent un groupe éteint, très différent de tous les végétaux actuels et toutes nos connaissances dérivent donc nécessairement des restes fossiles. Nathorst [2] a recueilli certains de ces gynécées, disques de charbon d'environ 3 cm de

diamètre et 1 mm d'épaisseur, et montré que leur surface porte des ornementations fines et nettes; leur nature restait cependant obscure. On a obtenu des résultats spectaculaires en faisant macérer des fragments de ces gynécées. On découvrit alors que ces surfaces étaient faites de deux sortes d'unités: des plaques hexagonales que l'on sait maintenant être les têtes cuirassées de petites écailles, et des petits tubes qui sont les micropyles ou parties de la graine réceptrices du pollen. Un travail plus poussé a montré la présence de grains de pollen à l'intérieur des micropyles et celle de différentes cuticules autour et à l'intérieur de la graine.

Les organes reproducteurs des plantes fossiles se présentent souvent sous forme d'infimes particules de charbon et beaucoup parmi les premiers paléobotanistes ne leur reconnaissaient aucune valeur documentaire. Pourtant, à l'heure actuelle une graine fossile minuscule peut fournir plusieurs cuticules dont chacune possède des cellules caractéristiques et aussi, à l'occasion, les grains de pollen assurant sa pollinisation.

On a déjà évoqué ici le problème de la fragmentation — attribution des différents organes d'une même plante, trouvés isolément, à des espèces différentes. Il est difficile de réunir les différents éléments les uns aux autres, mais si nous décidons d'attendre jusqu'à la découverte d'un échantillon favorable présentant ces éléments en liaison les uns avec les autres, nous devrons souvent attendre longtemps. La plupart du temps la première suggestion vient d'une association répétée, mais ceci prouve simplement que les deux organes proviennent de plantes appartenant au même type de végétation. On pourrait citer à ce sujet beaucoup d'exemples et le travail de Miss Kendall [3] nous en fournit un simple et récent; il a permis de relier entre eux la tige de conifère *Brachyphyllum mamillare* et l'écaille de cône *Araucarites phillipsi* que l'on a trouvées ensemble un grand nombre de fois. L'écaille ressemble aux organes porteurs des graines qui se détachent à maturité des cônes d'*Araucaria*. La tige présente de minuscules feuilles semblables à des écailles, et analogues à celles de certains cyprès, mais très différentes de celles d'*Araucaria*. Une écaille de cône d'*Araucaria* est en grande partie ligneuse mais son extrémité pointue est verte comme une feuille jeune et possède un épiderme semblable à celui de la feuille de la même plante. On retrouve cette particularité dans les fossiles, la cuticule de l'extrémité d'*Araucarites phillipsi* étant identique à celle de la feuille de *B. mamillare*, laquelle ressemble de façon surprenante à celle d'*Araucaria*. Comme aucun autre fossile de cette flore ne possède de cuticule de ce type on a conclu que *Araucarites phillipsi* était identique à *Brachyphyllum mamillare*. Par la suite, la découverte d'un cône intact attaché sur un rameau a montré le bien-fondé de cette conclusion.

Les spores et les grains de pollen fossiles se trouvent conservés comme les cuticules [4]. Géologiquement parlant, ils peuvent fournir d'excellents fossiles de zone car le vent les emporte très loin et ils se déposent à la fois dans les vases marines près des côtes et dans les lacs loin dans les terres. Les géologues pétroliers les ont trouvés très utiles pour mettre en corrélation de tels dépôts qui n'ont pas d'autres fossiles en commun.

Du point de vue botanique, ils démontrent l'existence de beaucoup de plantes en dehors de celles qui croissaient le long des rivières et qui fournirent les fossiles ordinaires. Il est pourtant nécessaire d'être prudent dans l'interprétation des résultats: les grains de pollen sont des organes plutôt simples et l'aplatissement abolit certains de leurs caractères; leur identification est donc souvent difficile. Ainsi quelques travailleurs ont signalé des grains de pollen de Dicotylédones provenant de plusieurs localités jurassiques, mais d'autres discutent ces identifications et considèrent ces grains comme étant du pollen de Gymnospermes ou des spores de fougères déformées par la compression.

Malgré la simplicité et la commodité de la méthode actuelle d'isolement de la cuticule, il reste ce fait fondamentalement mauvais qu'elle détruit tout le reste du matériel. Nous avons conscience que le fossile comprimé doit comprendre dans sa substance charbonneuse, non seulement les cuticules, mais tous les autres tissus qui ont survécu à la décomposition bactérienne, et que si seulement nous pouvions trouver une méthode appropriée nous serions capables de mettre en évidence tous ces tissus.

BIBLIOGRAPHIE

[1] HARRIS, T. M. *Medd. Grønland*, **85**, 2, 3, 5, 1931; **112**, 1, 2, 1935–37.

[2] NATHORST, A. G. «Paläobotanische Mitteilungen» 8. *K. Svenska VetenskAkad. Handl.* No. 4. 1909.

[3] KENDALL, M. W. *Ann. Bot., Lond.*, N.S., **13**, 151, 1949.

[4] GODWIN, H. *Endeavour*, **10**, 5, 1951.

La production d'électricité par les poissons

par R. D. KEYNES

Il y a plus de 200 ans que l'on a découvert la propriété qu'ont certains poissons de produire des potentiels électriques importants, mais ce n'est que récemment que l'on a pu expliquer d'une manière claire la façon dont les voltages relativement petits, produits par chacune des cellules de l'organe électrique, s'ajoutent au cours de la décharge. Un nouvel intérêt s'attache à ce sujet du fait de la découverte que certains poissons électriques utilisent leur décharge pour le fonctionnement d'un appareil leur permettant de s'orienter.

En septembre 1751, au cours d'un voyage en Afrique occidentale, Michel Adanson [1] rencontra l'étrange poisson électrique que l'on appelle maintenant *Malapterurus electricus*, le poisson-chat électrique. Il écrivait: «Les nègres le nomment ouaniear, et les françois trembleur, à cause de la propriété qu'il a de causer, non un engourdissement comme la torpille, mais un tremblement très-douloureux dans les membres de ceux qui le touchent. Son effet qui ne m'a pas paru différer sensiblement de la commotion électrique de l'expérience de Leyde, que j'avois déjà éprouvée plusieurs fois, . . .». Cette observation, faite environ 35 ans avant les fameuses expériences de Galvani, semble avoir été la première où les propriétés électriques du poisson furent reconnues comme telles, bien que les conséquences désagréables de sa manipulation inconsidérée fussent connues depuis longtemps. L'autre poisson électrique mentionné, *Torpedo*, était familier aux Romains et aux Grecs — Scribonius en recommandait l'usage pour guérir les maux de tête chroniques et la goutte — et sa décharge a été décrite comme étant électrique pour la première fois en 1773 [2]. Deux ans plus tard, paraissait, dans les *Transactions of the Royal Society*, une lettre d'un médecin américain concernant quelques expériences effectuées à Philadelphie sur la décharge de l'anguille électrique, *Electrophorus* (anciennement *Gymnotus*) *electricus* [3]. John Hunter fit des dissections de *Torpedo* et d'*Electrophorus* et les échantillons de *Torpedo* sont encore conservés en bon état au Musée du *Royal College of Surgeons* [4]. La figure 1 montre des photographies de deux de ceux-ci qui mettent admirablement en évidence les organes électriques en forme de rein, constitués de nombreuses colonnes de minces «plaques électriques» hexagonales empilées comme des pièces de monnaie, et innervées par quatre gros troncs nerveux issus du lobe électrique du cerveau.

Au cours des 180 années écoulées depuis ces dissections, l'organe électrique a retenu l'attention de beaucoup de physiciens et de physiologistes; Franklin, Cavendish, Volta, Davy, du Bois-Reymond, Faraday et Bernstein sont seulement quelques-uns des scientifiques éminents ayant travaillé sur les poissons électriques. La plupart des premiers travaux visaient à établir que l'électricité fournie par des sources «animées» était la même que celle produite par les sources «inanimées» et à faire l'anatomie détaillée de l'organe électrique. On découvrit plusieurs autres espèces de poissons électriques parmi lesquelles l'*Astroscopus* d'Amérique du Nord qui possède une décharge assez puissante (la première description est de Dahlgren, en 1906) et, d'après les preuves anatomiques, d'autres dont la décharge est relativement faible (les raies, une famille de poissons africains: les mormyrides, et les gymnotides de l'Amérique du Sud, très voisins d'*Electrophorus*). Probablement parce que la décharge de l'organe électrique était plus aisée à détecter, avec les moyens de mesure relativement peu sensibles dont on disposait au XIXe siècle, que les voltages plus faibles produits par les muscles et les nerfs, on lui a accordé une attention presque disproportionnée, à en juger par la longueur des chapitres consacrés à ses propriétés dans les manuels de 1900. Pourtant, quand on se rend compte que, même avec un *Malapterurus* entier à sa disposition, du Bois-Reymond [5] faisait ses mesures à l'aide du dispositif de la figure 4 dont la fidélité ne peut être très élevée, on comprend en partie pourquoi ces mêmes livres ne nous conduisent pas bien loin dans la voie d'une explication valable de l'origine de l'électricité animale.

Dans tous les poissons électriques, l'organe électrique est constitué d'un grand nombre de cellules en disques appelées électroplaques, chacune possédant un nerf connecté à l'une de ses faces mais pas à l'autre. Ces électroplaques sont disposées en colonnes, toutes les faces innervées orientées du même côté. Chez *Torpedo* les électroplaques sont

dans un plan horizontal, très serrées les unes contre les autres et formant un organe électrique large et plat dont les cellules se déchargent en parallèle plutôt qu'en série, comme il convient à un poisson marin vivant dans un milieu dont la résistance électrique est relativement basse. A l'exception d'*Astroscopus*, les autres poissons électriques ont des électroplaques verticales, ordinairement séparées par de grands espaces et disposées plutôt en série qu'en parallèle. Les surfaces des électroplaques sont souvent parsemées de papilles proéminentes (figure 2), dont la fonction est probablement d'accroître la surface totale et donc d'abaisser la résistance interne effective de l'organe. Un exemple extrême de développement spécialisé nous est fourni par *Electrophorus*, où près des quatre cinquièmes des parties latérales du poisson sont occupés par l'organe électrique (figure 3). Cette énorme masse de tissu électrique se compose d'environ 70 colonnes d'électroplaques, chacune ne contenant pas moins de 6000 cellules en série. En circuit ouvert (c'est-à-dire dans l'air), une anguille électrique peut fournir de brèves décharges (3 msec) allant jusqu'à 600 volts de potentiel; en court-circuit la pointe de courant est de l'ordre d'un ampère. Le maximum de puissance fournie est supérieur à 100 watts — environ un demi-ampère sous 200 à 300 volts. Une grosse torpille est capable de produire un courant de plusieurs ampères sous environ 50 volts, si bien qu'au point de vue de l'énergie fournie cette espèce est la plus puissante des poissons électriques. A l'autre bout de l'échelle, les mormyrides, les gymnotides autres qu'*Electrophorus* et les raies ont des organes électriques beaucoup plus petits, ayant une structure en forme de fuseau qui remplace certains des muscles caudaux et dont les décharges ne sont que de l'ordre de un à deux volts. Celles d'*Astroscopus* et de *Malapterurus* ont des valeurs intermédiaires.

Les problèmes qui ont peut-être le plus intrigué les physiologistes ont été d'expliquer comment se fait la décharge additive des plaques électriques et de savoir quelle est la source de l'énergie dépensée, lors de la décharge. Jusqu'en 1900, il n'y avait pas de réponse convaincante à ces questions, mais c'est à peu près à cette date que Bernstein émit [6] l'hypothèse géniale de la polarisation des électroplaques, l'intérieur de chaque cellule étant négatif par rapport à l'extérieur et le potentiel de la face innervée s'abaissant brusquement, au cours de la décharge, en laissant celui de la face non nerveuse inchangé. Cependant, malgré quelques expériences physiques très intéressantes, faites sur *Torpedo* [7], qui fournirent la preuve que la source immédiate de l'énergie de décharge est un gradient de concentration ionique préexistant plutôt qu'une réaction chimique, l'auteur ne disposait d'aucun moyen pour contrôler sa principale hypothèse. La méthode appropriée dans ce cas est l'emploi de micropipettes de verre, remplies de chlorure de potassium, et faisant 0,5 μ de diamètre à l'extrémité [8]. En utilisant des paires de telles microélectrodes, reliées au moyen d'un amplificateur différentiel directement couplé à un oscillographe cathodique, et en insérant l'une d'elle dans une des électroplaques d'une coupe de tissu électrique, on a montré [9, 10] qu'au moins pour *Electrophorus* l'hypothèse était assez valable. Comme on peut le voir sur la figure 5, l'intérieur d'une électroplaque au repos est négatif par rapport à l'extérieur de quelques 90 mV, et la seule erreur de Bernstein consistait dans le fait que la différence de potentiel à travers la face nerveuse ne s'annule pas seulement durant l'activité, mais s'inverse jusqu'à atteindre environ 60 mV. La différence de potentiel à travers la face non nerveuse change à peine, si bien que chaque électroplaque contribue pour 150 mV à la décharge totale, de la manière indiquée sur la figure 6.

Les recherches d'embryologie et d'anatomie comparée de l'organe électrique ont montré depuis longtemps que, sauf dans le cas de *Malapterurus*, les électroplaques dérivent de fibres musculaires, ou peut-être de régions spéciales de celles-ci, appelées «plaques motrices», où les nerfs moteurs prennent contact avec les muscles et où l'arrivée d'un influx nerveux induit un potentiel d'action correspondant, qui se propage à la surface de la fibre musculaire. On a quelquefois affirmé que l'étude de l'organe électrique pourrait contribuer à l'explication du mécanisme de la transmission neuro-musculaire, mais c'est en fait le contraire qui s'est produit [11]. La principale différence entre l'activité électrique telle qu'elle se produit à la plaque motrice et celle qui se déroule dans le nerf ou dans une fibre musculaire, est que le premier phénomène dépend de la libération d'un médiateur chimique, l'acéthylcholine, par les terminaisons nerveuses et ne peut résulter de l'application de courants électriques, tandis que les membranes musculaires ou nerveuses, non affectées par l'acéthylcholine, sont excitables électriquement. Une autre différence, importante ici, est que la dépolarisation, provoquée par l'acéthylcholine à la plaque motrice, consiste en un abaissement du potentiel de membrane vers zéro et ne comporte pas l'important renversement de polarité que l'on observe ailleurs dans le nerf et le muscle.

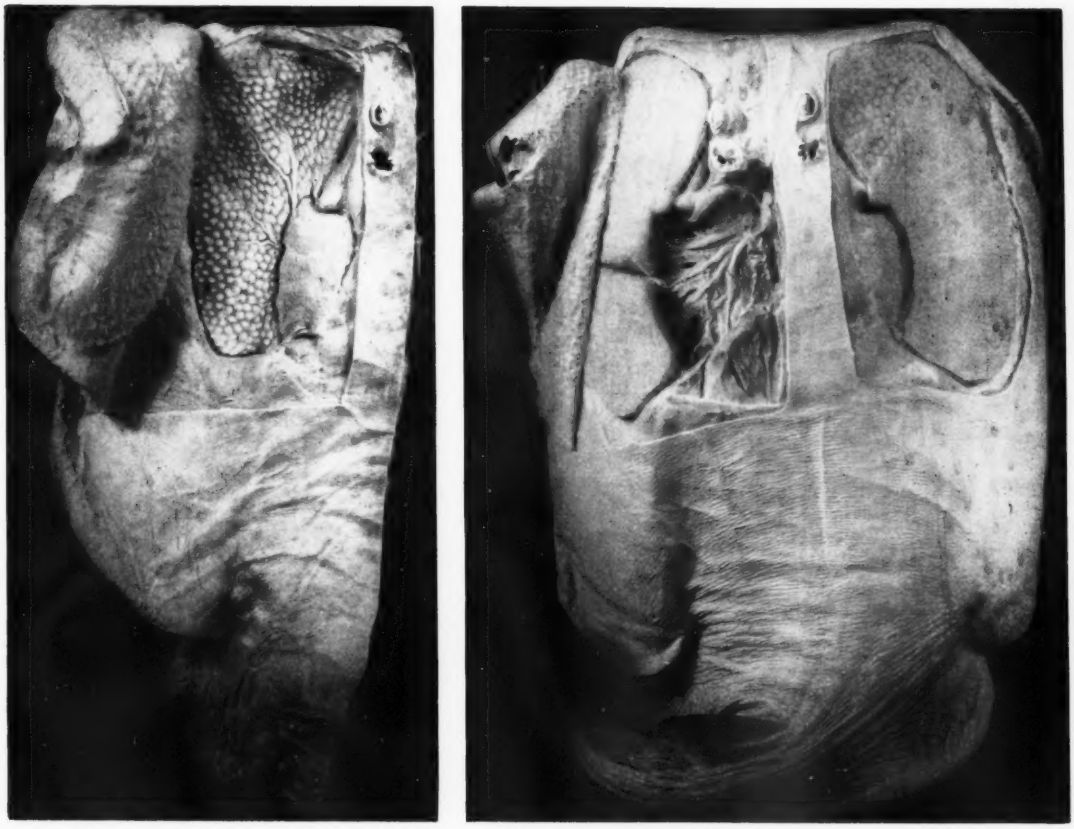
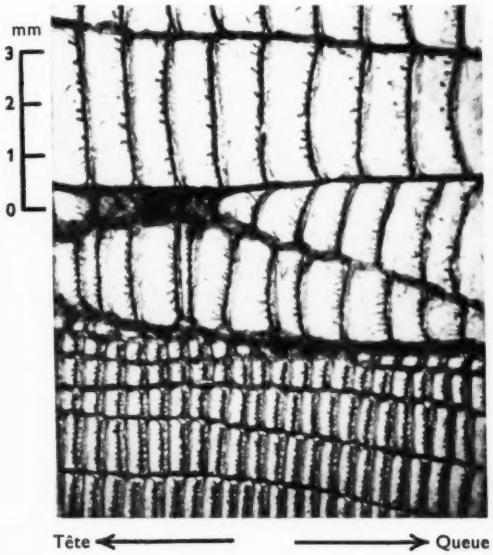
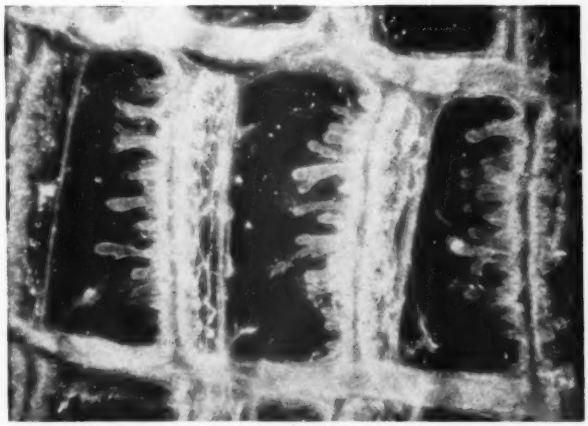


FIGURE 1 – *Deux spécimens de* Torpedo *disséqués par John Hunter pour mettre en évidence les organes électriques et leur innervation.*



(a)



(b)

FIGURE 2 – *Microphotographies de coupes transversales de l'organe électrique d'*Electrophorus electricus. (a), *l'organe de Sachs (électroplaques très espacées) recouvre le principal organe électrique (disposition serrée).* (b), *grossissement* 5 × *plus fort que pour* (a), *auquel se réfère l'échelle. Les électroplaques sont innervées sur les faces tournées vers la queue du poisson* [9].

(a)

(b)

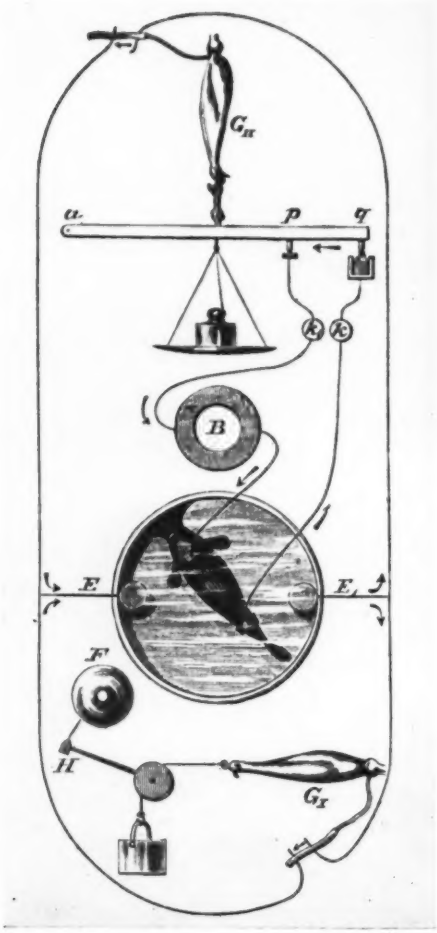


FIGURE 3 – (a) *Anguille électrique vivante et* (b) *coupe à travers le principal organe électrique. Le tiers supérieur du corps est occupé par les muscles, la moelle épinière et la vessie natatoire, tandis que les colonnes translucides d'électroplaques remplissent le reste. Sous le principal organe il existe une subdivision de l'organe électrique, nommée d'après John Hunter.*

FIGURE 4 – *Montage de du Bois-Reymond. Une préparation neuro-musculaire de grenouille* (G_I) *fait sonner une cloche quand le poisson émet sa décharge et une deuxième* (G_{II}) *sert à déconnecter le galvanomètre* (*B*) *après mesure de la première décharge du groupe.*

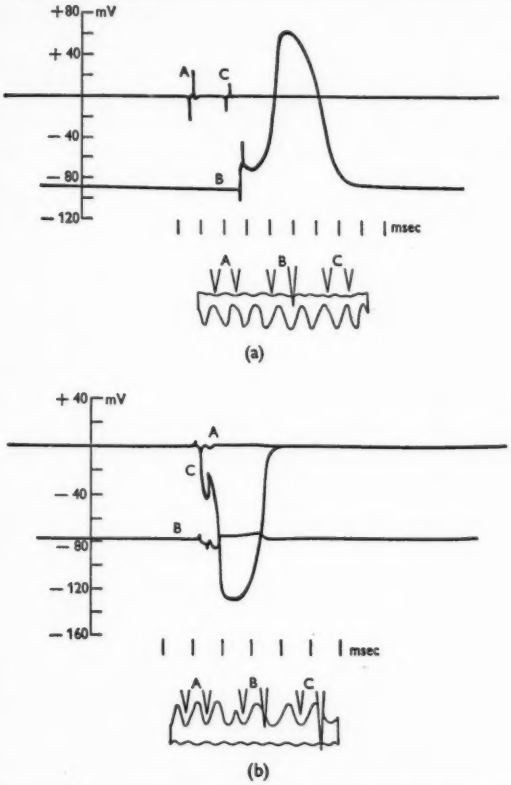


FIGURE 5 – *Enregistrements dus aux microélectrodes, des potentiels de membrane dans les électroplaques d'*Electrophorus electricus, (a) *au voisinage de la face innervée,* (b) *à travers la face non nerveuse (indiquée schématiquement par la présence des papilles). Le potentiel d'action est précédé d'un artefact de stimulation, qui n'est pas parfaitement synchronisé sur les courbes successives* [9].

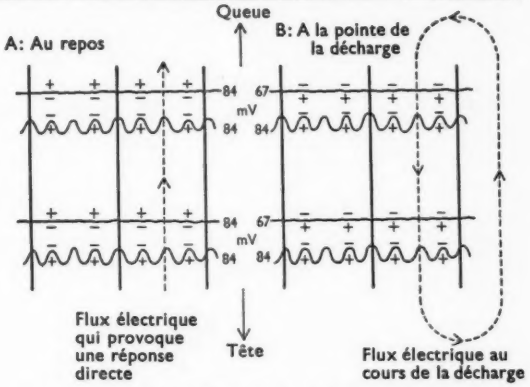


FIGURE 6 – *Schéma illustrant la décharge des électroplaques d'*Electrophorus. *Les chiffres sont des moyennes de résultats obtenus à partir d'un grand nombre de spécimens.* [9].

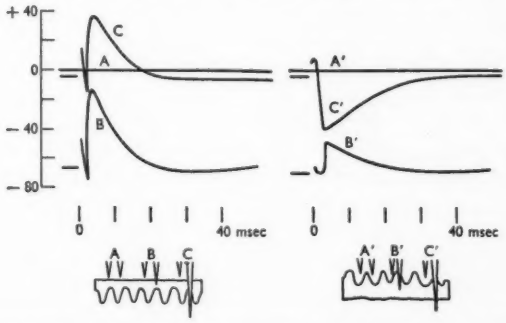


FIGURE 7 – *Enregistrements, grâce aux microélectrodes, des potentiels de membrane dans les électroplaques de* Raia clavata. *Dans cette espèce il semble y avoir, contrairement à ce qui se passe pour* Electrophorus (*figure* 5), *une chute appréciable du voltage entre les deux côtés de la face non nerveuse; noter aussi la différence dans l'échelle des temps et la forme de la réponse* [24].

Chez *Electrophorus*, il existe certainement une forte inversion de la différence de potentiel (figure 5) et l'on peut mettre directement en action la face nerveuse de l'électroplaque par application de chocs électriques [12]; on en a donc conclu que l'on devait regarder l'électroplaque comme une fibre musculaire modifiée et non comme une plaque motrice modifiée. Cette distinction est encore affirmée par un travail récent [10], d'après lequel la membrane de la face nerveuse, principalement de type musculaire, serait parsemée de régions de jonction ayant beaucoup de choses en commun, à la fois pour le comportement électrique et la fonction, avec les plaques motrices. Il se peut que dans d'autres espèces la situation soit différente; chez *Torpedo* et *Raia*, il est probable que l'on peut légitimement comparer les électroplaques à des plaques motrices ayant subi une énorme croissance et qu'elles ne contiennent que peu, ou même pas du tout, de membrane de type musculaire. Les enregistrements aux microélectrodes de *Raia* (figure 7) ont montré qu'ici la différence de potentiel à travers la face nerveuse ne s'inverse que peu durant l'activité et son évolution dans le temps ressemble d'une manière frappante à celle du potentiel d'une plaque motrice. De plus, chez ces deux poissons élasmobranches, l'organe électrique n'est pas directement excitable et l'on ne peut provoquer sa décharge qu'en stimulant ses nerfs; et aussi, contrairement à ce qui se passe avec *Electrophorus*, le traitement au curare peut mettre l'organe électrique complètement hors d'action. Il n'est pas surprenant qu'il existe quelques variations dans le mode de décharge des différents organes électriques puisqu'ils se sont évidemment développés d'une manière tout à fait indépendante

dans les différentes familles de poissons électriques et qu'il n'y a aucune raison pour que leur évolution ait suivi partout un cours identique.

La question de savoir ce qui donne naissance à la polarisation initiale de la membrane cellulaire et à la modification de potentiel à travers la face nerveuse durant l'activité ne peut se résoudre que par analogie avec le nerf et le muscle, dont les propriétés électriques ont été étudiées beaucoup plus intensivement avec les techniques modernes que ne l'ont été celles de l'organe électrique. La base de l'hypothèse ionique [13] de la conduction nerveuse est que tous les tissus excitables ont une forte concentration interne en potassium et une faible concentration en sodium par rapport aux taux élevés de sodium et faibles de potassium trouvés dans les milieux liquides qui les baignent. L'organe électrique d'*Electrophorus* ne fait pas exception à cette règle [14]. On peut penser que le potentiel de membrane au repos provient du gradient de concentration du potassium, puisque la membrane au repos se comporte comme si elle était presque exclusivement perméable aux ions potassium. On a montré que le potentiel d'action résulte d'un accroissement important, mais strictement momentané, de la perméabilité de la membrane aux ions sodium. La source immédiate de l'énergie fournissant les courants de la propagation d'un influx, et donc, selon toute probabilité, ceux de la décharge d'un organe électrique, est l'entrée d'une petite quantité de sodium à l'intérieur de la cellule, suivie de la perte d'une quantité égale de potassium. Le contenu ionique de la cellule se rapproche donc de celui du milieu ambiant, puis le retour en arrière paraît se réaliser par un mécanisme de transport actif tirant son énergie du métabolisme cellulaire et capable simultanément d'exsuder du sodium et d'absorber du potassium, contre les gradients de concentration [15]. Cependant, bien que l'on ait examiné avec quelque détail le travail du mécanisme de conduction et de ce que l'on appelle la «pompe à sodium» dans différents tissus excitables, et établi que la succession attendue des modifications de perméabilité et le transfert d'ions se produisent bien, il faut admettre qu'il n'existe encore aucune indication concernant la nature précise, à l'échelle moléculaire, des phénomènes qui assurent le passage des ions sodium et potassium à travers la membrane cellulaire. On pourrait aussi noter que les modifications de perméabilité, provoquées par la libération d'acéthylcholine à la plaque motrice, sont un peu différentes de celles que nous avons résumées ci-dessus [11], mais que le mélange des ions y est aussi probablement la source immédiate de l'énergie nécessaire aux modifications de potentiel.

Il existe un organe électrique — celui de *Malapterurus* — auquel une grande partie de ce que nous venons de dire ne s'applique pas. En effet, on pense que dans cette espèce les électroplaques dérivent d'un tissu glandulaire et non musculaire. *Malapterurus* diffère aussi des autres poissons électriques en ce que les faces innervées des électroplaques deviennent positives au cours de la décharge et non négatives (voir figures 5 et 7). Ceci suggère, soit que la différence de potentiel initiale de repos à travers la face nerveuse a une polarité normale (l'intérieur de la cellule étant négatif) mais qu'elle s'accroît durant l'activité au lieu de décroître ou de s'inverser, soit que le potentiel de membrane décroît bien durant l'activité mais se trouve initialement de sens opposé (intérieur de la cellule positif) à celui des fibres nerveuses et musculaires. Les deux explications nécessitent des mouvements ioniques différents de ceux que l'on a étudiés autre part et l'on ne pourra décider entre elles qu'à la suite d'une étude de l'organe électrique de cet intéressant poisson avec des microélectrodes.

Il est clair qu'en aucun cas l'organe électrique ne se décharge spontanément; il reste toujours sous le contrôle du système nerveux central. Même chez les poissons qui produisent une série continue de décharges avec une vitesse de répétition fixe, indépendante de ce qu'ils font à un moment donné, on a montré qu'un refroidissement local du cerveau abaisse la fréquence [16]. L'anatomie des voies motrices conduisant du cerveau à l'organe électrique a retenu l'attention et l'on a découvert que la plupart des poissons électriques ont des cellules nerveuses particulièrement grandes dans la moelle épinière (ou, chez *Torpedo*, dans le cerveau lui-même) d'où partent les nerfs des électroplaques. Chez la torpille, toutes les régions de l'organe électrique sont approximativement équidistantes du cerveau, mais la question se pose de savoir pourquoi dans un poisson aussi long — jusqu'à deux mètres — qu'*Electrophorus*, il n'existe pas de différence sérieuse dans le temps total entre les influx nerveux mettant en action les extrémités opposées de l'organe. En fait, toutes les parties de l'organe se déchargent presque simultanément [17], comme elles doivent le faire pour produire le voltage maximum. On a récemment examiné ce problème [18] et trouvé que les différences dans les temps de conduction le long de la moelle épinière se compensent de plusieurs manières, si bien que l'initiation de la décharge au lieu de demander un temps calculé de 12 msec ne demande

qu'environ 1,5 msec. Il est intéressant de faire des hypothèses sur la manière dont est synchronisée la décharge de *Malapterurus* puisque cette espèce est la seule dont toutes les électroplaques de chacune des moitiés de l'organe sont innervées par les branches d'une seule fibre nerveuse, ce qui semble exclure certains des mécanismes de compensation décrits pour *Electrophorus*.

Un aspect, qui n'est pas le moins intéressant, de la physiologie des poissons électriques est l'usage qu'ils font de ces organes. Il suffit de mettre une grenouille dans un bassin où nagent des anguilles électriques et de voir comment elle est étourdie puis dévorée, pour se convaincre qu'*Electrophorus* fait de son électricité un usage offensif, mais cette sorte d'observation est moins facile à faire pour les torpilles. Cependant, on a pu décider des spécimens de *Torpedo nobiliana* à attaquer un poisson mort remorqué dans l'eau par un fil et l'on a décrit la manière dont les nageoires pectorales de la torpille entourent la proie avant la décharge [19]. Il est curieux qu'il n'existe que peu de preuves directes que les autres poissons, possédant des organes électriques relativement grands, s'en servent habituellement pour attaquer, bien que l'on ait suggéré que *Malapterurus* emploie sa décharge pour faire dégorger à d'autres poissons leur nourriture, comme les mouettes pillardes le font aux goélands. Tous les poissons électriques semblant donner des décharges très facilement quand on les touche ou qu'on les inquiète, il est possible que, dans beaucoup d'espèces, le principal rôle de la décharge soit défensif et l'on a vu [19] une torpille se décharger apparemment dans le but d'éloigner des intrus. Il faudra étudier davantage les mœurs des poissons électriques, pour élucider ce dernier point.

Dans le cas des petits poissons électriques, un nouveau domaine de recherche important s'est ouvert depuis la découverte faite à Cambridge [20] et à New-York [16, 21] que *Gymnarchus niloticus* et différents gymnotides et mormyrides produisent une série continue de décharges qui semblent avoir pour but la recherche de la direction. Chez *Gymnarchus* la fréquence est remarquablement constante (environ 300 décharges/sec) mais dans la plupart des autres espèces la fréquence varie, peut-être avec le degré d'intérêt que porte le poisson à son milieu. Ce fait est particulièrement manifeste dans le cas d'*Electrophorus* qui émet (probablement grâce à la partie caudale de son organe électrique, où les électroplaques sont plus espacées et qui est connue sous le nom d'organe de Sachs) de petites décharges d'orientation en plus des groupes mortels de grandes décharges déjà décrits [9]. Une anguille électrique stationnaire est électriquement silencieuse mais dès qu'elle commence à remuer elle émet des décharges à la fréquence d'environ 50/sec [22]. On a montré [20] que *Gymnarchus* est capable de distinguer dans l'eau les corps conducteurs des non conducteurs, selon toute probabilité parce qu'il est extrêmement sensible aux modifications de flux électrique dans l'eau avoisinante au cours de la décharge. On ne sait pas encore comment fonctionne la partie sensitive de l'appareil d'orientation, ni même où sont localisés les détecteurs. Il a été remarqué, cependant, que le vernissage de la tête d'*Electrophorus* trouble ses facultés d'orientation [22].

Charles Darwin [23] n'a pas réussi à expliquer l'évolution de l'organe électrique, car il n'existe apparemment aucun stade de transition entre l'absence complète de l'organe et son extrême développement, atteint chez *Electrophorus* par exemple. Cependant, les petits organes servant à l'orientation chez les gymnotides et les mormyrides aident à combler cette lacune, sans toutefois résoudre le problème en entier, puisque nous ne possédons aucune preuve que les autres poissons électriques (Torpilles, Raies, *Astroscopus*, et *Malapterurus*) utilisent leur organe pour l'orientation. En tout cas, les trois premières familles vivant en eau de mer, on peut s'attendre à ce qu'un système d'orientation électrique y soit d'un usage très limité. L'histoire évolutive de l'organe électrique reste donc une question non résolue, bien que très intéressante.

REMERCIEMENTS

Je remercie Miss J. Dobson, Mr Edwards et le *Royal College of Surgeons* pour les photographies de la figure 1, le Dr A. Couceiro pour celles de la figure 2 et le *Journal of Physiology* qui m'a permis de reproduire les figures 2, 5, 6 et 7.

RÉFÉRENCES

[1] ADANSON, M. «Histoire naturelle du Sénégal». Bauche, Paris. 1757.
[2] WALSH, J. *Phil. Trans.*, **63**, 461, 1773.
[3] WILLIAMSON, H. *Ibid.*, **65**, 94, 1775.
[4] HUNTER, J. *Ibid.*, **63**, 481, 1773; *ibid.*, **65**, 395, 1775.
[5] DU BOIS-REYMOND, E. «Biological Memoirs. Physiology of nerve, muscle, and the electric organ». Oxford University Press. 1887.
[6] BERNSTEIN, J. «Elektrobiologie». Vieweg, Braunschweig. 1912.

RÉFÉRENCES (*suite*)

[7] BERNSTEIN, J. et TSCHERMAK, A. *Pflüg. Arch. ges. Physiol.*, **112**, 439, 1906.

[8] LING, G. et GERARD, R. W. *J. cell. comp. Physiol.*, **34**, 383, 1949.

[9] KEYNES, R. D. et MARTINS-FERREIRA, H. *J. Physiol.*, **119**, 315, 1953.

[10] ALTAMIRANO, M., COATES, C. W., GRUNDFEST, H. et NACHMANSOHN, D. *J. gen. Physiol.*, **37**, 91, 1953. ALTAMIRANO, M., COATES, C. W. et GRUNDFEST, H. *Ibid.*, **38**, 319, 1955.

[11] KATZ, B. et DEL CASTILLO, J. *Progr. Biophys. biophys. Chem.*, **6**, 122, 1956.

[12] ALBE-FESSARD, D., CHAGAS, C. et MARTINS-FERREIRA, H. *C.R. Acad. Sci., Paris*, **232**, 1015, 1951.

[13] HODGKIN, A. L. *Biol. Rev.*, **26**, 339, 1951.

[14] DAVSON, H. et LAGE, H. V. *Ann. Acad. bras. Sci.*, **25**, 303, 1953.

[15] HODGKIN, A. L. et KEYNES, R. D. *J. Physiol.*, **128**, 28, 1955.

[16] COATES, C. W., ALTAMIRANO, M. et GRUNDFEST, H. *Science*, **120**, 845, 1954.

[17] COATES, C. W., COX, R. T., ROSENBLITH, W. A. et BROWN, M. V. *Zoologica, N.Y.*, **25**, 249, 1940.

[18] ALBE-FESSARD, D. et MARTINS-FERREIRA, H. *J. Physiol. Path. gén.*, **45**, 533, 1953.

[19] WILSON, D. P. *J. Mar. biol. Ass. U.K.*, **32**, 199, 1953.

[20] LISSMANN, H. W. *Nature, Lond.*, **167**, 201, 1951.

[21] COATES, C. W. *Elect. Engng, N.Y.*, **69**, 47, 1950.

[22] *Idem. Anim. Kingd.*, **57**, 182, 1954.

[23] DARWIN, C. «The Origin of Species». Murray, Londres. 1859.

[24] BROCK, L. G., ECCLES, R. M. et KEYNES, R. D. *J. Physiol.*, **122**, 429, 1953.

Revue des livres

ASTRONOMIE

DE CALLATAŸ, VINCENT: *Atlas du Ciel*. Pp. 157. Les Éditions de Visscher, Bruxelles. 1955. 450 fr. belges.

Cet atlas a été composé à l'intention des amateurs voulant observer le ciel et identifier les corps célestes sans aide optique. Il renferme 45 planches où les étoiles sont représentées par des points blancs sur fond noir pour imiter autant que possible l'aspect du ciel. Les anciennes constellations mythologiques ne sont pas indiquées et les cartes ne portent aucun nom, mais les étoiles les plus brillantes sont reliées par des traits fins pour aider à les reconnaître. Neuf des planches sont sous la forme de planisphères, représentant le ciel à des latitudes différentes; les autres sont à une plus grande échelle et traitent l'ensemble du ciel en détail. Aucunes étoiles ne sont indiquées au-dessous de la 5e grandeur.

Des cartes à petite échelle portant les noms des constellations et leurs limites fixés par l'Union Astronomique Internationale, ainsi que les noms ou les désignations des étoiles les plus brillantes, accompagnent les planches. Les points remarquables principaux de chaque constellation sont indiqués et décrits. Chaque planche est suivie d'un texte concernant un ou plusieurs objets de la partie du ciel en cause. Ces commentaires constituent dans leur ensemble un bref exposé descriptif élémentaire de l'astronomie moderne. Ils ne suivent pas un ordre logique, mais un index à l'usage des débutants indique dans quel ordre les lire.

On peut recommander en toute confiance cet atlas à ceux qui veulent faire de l'astronomie sans aide visuelle. Les 9 premières planches sont les moins satisfaisantes, la taille des disques représentant les étoiles ne donnant pas une idée adéquate des grandeurs relatives des astres; elles serviront, néanmoins, à montrer la position des diverses constellations les unes par rapport aux autres.

H. SPENCER JONES

BIOCHIMIE

BALDWIN, E. et BELL, D. J. revue et rédigée à nouveau par: *Cole's Practical Physiological Chemistry* (10e édition). Pp. x + 263. W. Heffer and Sons Limited, Cambridge. 1955. 21s.

Bon nombre de biochimistes et de physiologues du début du siècle firent connaissance avec la chimie physiologique grâce au livre de Cole. Cette dixième édition, qui vient quelque vingt ans après la précédente, est justement dédiée à sa mémoire. Elle retient l'essence des éditions antérieures: les principes sont bien expliqués, bien illustrés et même accompagnés d'expériences supplémentaires d'une nature simple et directe. L'ordre des chapitres a été quelque peu modifié et nombre de pages ont été remaniées. On retrouve pourtant beaucoup des expériences premières, avec des modifications parfois; toutes concernent des corps d'accès aisé. Les auteurs déclarent franchement que les méthodes étudiées ne sont ni les plus récentes ni les plus exactes mais qu'elles ont été bien éprouvées et capables d'être employées avec succès par l'étudiant muni d'appareils simples. C'est un livre qui offrira à l'étudiant, celui qui se destine à la médecine, en particulier, une introduction pratique de valeur à la chimie physiologique élémentaire qualitative et quantitative. Ceux dont les études ne demandent qu'une connaissance des caractéristiques fondamentales des substances organiques trouveront ici exactement ce qu'il leur faut. L'essence du premier volume n'a pas été perdue et les notes explicatives d'introduction aux expériences pratiques sont toujours claires et directes; les notes au bas des pages sont moins abondantes, mais toujours instructives.

J. R. P. O'BRIEN

WAGNER, R. P. et MITCHELL, H. K.: *Genetics and Metabolism*. Pp. xi + 444. John Wiley and Sons Inc., New York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1955. 60s.

Le rapprochement rapide de la génétique et de la biochimie a conduit à la parution récente d'un certain nombre d'ouvrages traitant de cette fusion. Le

livre actuel complète utilement celui de Haldane, *Biochemistry of Genetics*, chacun comblant les lacunes de l'autre. Les chapitres d'introduction sont les moins satisfaisants. Ils débutent par une étude du gène, mais le gène n'est pas le commencement de la génétique: il ne paraît qu'à mi-chemin. On aimerait y trouver, par exemple, une meilleure étude de la méiose. Le style télégraphique de résumé, genre américain, employé par endroits, est obscur et de construction défectueuse. Les auteurs n'ont pas suffisamment réfléchi non plus à l'aspect théorique et à la méthode scientifique. Le livre gagnerait à ce qu'ils oublient leurs «preuves» pour considérer l'évidence des faits. Heureusement, l'ouvrage s'améliore par la suite en portée et compréhension du sujet. C'est la première fois que l'on trouve réunie en un corps organisé cette masse de connaissances réelles et spéculatives qui aura sur les chercheurs une influence bienfaisante et étendue.

C. D. DARLINGTON

WESTERFELD, W. W., publié par: *Biochemical Preparations*, Vol. IV. Pp. VII + 108. John Wiley and Sons Inc., New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1955. 30s.

Avec la parution de ce volume, la série intitulée *Biochemical Preparations* est en voie de devenir aussi réputée que celle des *Organic Syntheses*. Elle offre au biochimiste un certain nombre de méthodes soigneusement mises au point pour la préparation de corps généralement peu accessibles. Ceux qui ne disposent même pas de petites quantités de corps biochimiques les plus courants trouveront ici des moyens de préparation relativement peu onéreux des matériaux de base. Le volume décrit la préparation par synthèse, emploi d'enzymes ou isolation, de 21 corps, dont le α-*d*-galactose-1-phosphate, le α-*d*-glucose-1-phosphate, l'acide homogentisique, la lécithine, la α-lactalbumine, la déshydrogénase d'alcool, l'acide urocanique et l'acide glutamique. Chaque méthode est utilement accompagnée de notes pour écarter les difficultés et de la description des propriétés et des preuves de pureté des corps en question. Un choix de procédés est donné pour la préparation de l'acide *d*-glutamique; l'un d'eux utilise la variété de Crookes d'*Escherichia coli* comme source de décarboxylase pour détruire l'antipode-*l* et le second, *Clostridium perfringens*. L'avantage de ces préparations biochimiques doubles est de permettre au chimiste d'en choisir une qui convienne aux facilités dont il dispose et d'en essayer une autre s'il n'est pas satisfait de la première. La série rendra surtout service aux chercheurs qui l'emploieront couramment, mais elle sera utile aussi aux étudiants à qui elle fournira de nombreux exemples de préparations pratiques.

J. R. P. O'BRIEN

BIOGRAPHIE

American Men of Science (9e édition), Vol. II (*The Biological Sciences*). Pp. 1276. The Science Press, Lancaster, Pa; Bowker Company, New-York. 1955. $20.

Ce volume est le second de la nouvelle édition de *American Men of Science* et consacré aux zoologistes, botanistes, spécialistes de recherche médicale et savants des domaines apparentés. Il renferme quelque 30 000 noms alors que le précédent sur les sciences physiques en comptait près de 44 000. Les savants des sciences doubles ont eu le choix de paraître dans l'un ou l'autre volume (biochimie et biophysique, par exemple), mais pour éviter les confusions on trouve de nombreuses références de rappel dans les deux tomes.

L'ouvrage suit le plan du premier. La seule différence apparente, incommode et superflue d'ailleurs, est dans le format. C'est une mine d'information concise et approfondie qui sera un ouvrage de référence indispensable à tous ceux qui s'intéressent à l'organisation de la recherche scientifique aux Etats-Unis. La nature de l'œuvre demande qu'une telle revue soit brève, mais brièveté ne signifie pas manque d'appréciation. Sa préparation a certainement demandé un effort considérable et nous sommes reconnaissants à tous ceux dont les travaux combinés l'ont menée à bien.

TREVOR I. WILLIAMS

Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society. Vol. I. Pp. 263. The Royal Society, Londres. 1955. 30s.

Ce volume est le premier d'une nouvelle série de publications annuelles devant faire suite aux Notices Nécrologiques des membres de la *Royal Society*. Le changement de titre n'implique pas de modification importante dans la conception de la série. Il sera pourtant bien accueilli, car l'expression notice nécrologique reflète mal le contenu de ces volumes qui tout en rappelant, comme on peut s'y attendre, des travaux scientifiques de premier ordre, renferment maintes anecdotes émouvantes sur des savants nullement confinés dans les limites étroites de leur science mais ayant vécu des existences pleines et variées. S'il convient de réfuter l'argument, encore entendu de nos jours, que les savants sont de froids matérialistes, nous avons là ample preuve du contraire. Cette série sera une source d'inspiration pour la génération actuelle et une mine d'information biographique authentique de valeur incomparable pour celles de l'avenir.

TREVOR I. WILLIAMS

BRODA, Engelbert: *Ludwig Boltzmann*. Pp. VIII + 152. Franz Deuticke, Vienne. 1955. Broché, DM 9,50; lin, DM 11.

Ludwig Boltzmann est le dernier des grands théoriciens de ce qu'on appelle maintenant l'époque classique de la physique. En 1906, à l'âge de soixante-deux ans, il mit fin à ses jours. Le premier exposé de la théorie quantique par Planck, il est vrai, avait paru en 1900 et le premier article d'Einstein sur la relativité en 1905, mais le meilleur de l'œuvre de Boltzmann avait été accompli avant le début du siècle. Il avait donc formulé ses propositions fondamentales sur la théorie cinétique des gaz à une époque où la théorie atomique était loin d'être acceptée couramment. Il avait, en particulier, intégré la conception de probabilité dans la théorie des gaz dont elle était devenue partie essentielle et fait œuvre de pionnier en fondant la physique statistique.

Boltzmann avait une personnalité captivante. C'était un conférencier qui attirait les foules par son prestige et sa clarté. Philosophe profond, il avait pourtant un esprit fin et mordant. Ces divers aspects de l'homme sont présentés de façon sympathique et intéressante dans le petit livre qui nous concerne, le premier, semble-t-il, qui lui soit consacré. Il est divisé en trois parties: L'Homme, Le Physicien, Le Philosophe. La première a un intérêt spécial car l'auteur a été en correspondance avec beaucoup de ceux qui, dans leur jeunesse, avaient connu le grand homme, avec Lise Meitner, en particulier, et avec la fille et la belle-fille de Boltzmann. Leurs souvenirs contribuent à animer ce portrait particulièrement vivant et personnel de l'un des pionniers de la science.

E. N. DA C. ANDRADE

BIOLOGIE

WADDINGTON, C. H.: *Principles of Embryology*. Pp. x + 510. George Allen and Unwin Limited, Londres. 1956. 45s.

Il est curieux de constater qu'il y a une centaine d'années, on faisait encore mal la distinction entre l'embryologie et la génétique, car Darwin, suivant la tradition hippocratique, attribuait la ressemblance entre parent et rejeton à l'existence de petites particules provenant des diverses parties du corps et dont le rôle était de déterminer la formation des organes correspondants dans l'organisme procréé. On pensait expliquer ainsi, non seulement la ressemblance héréditaire, mais le développement de l'embryon.

Vinrent ensuite les grandes découvertes de Mendel en génétique et de Roux en embryologie, dont il résulta que la génétique se spécialisa dans l'étude de la transmission des caractères héréditaires au rejeton tandis que l'embryologie s'occupait de la transformation de l'œuf en adulte. La première traitait des phénomènes se produisant pendant les deux générations de cellules qui comprennent la maturation des cellules sexuelles et leur fertilisation alors que la seconde s'attaquait au développement des cinquante générations de cellules qui séparent l'œuf fertilisé de l'homme fait.

De nos jours, une fois de plus, les deux sciences se rejoignent car les facteurs qui jouent dans la ressemblance héréditaire sont aussi clairement responsables du développement. Le Professeur Waddington fait ressortir les points saillants de l'embryologie puis s'occupe du rôle des gènes mendéliens dans l'orientation du développement, de la stimulation des gènes par le cytoplasme et de leur inhibition, et de la synthèse de substances nouvelles. Il est alors à même de formuler les principes du système de différenciation, l'origine de l'organisation et la production de la forme. Ce livre stimulant sera indispensable aux généticiens comme aux embryologistes.

G. DE BEER

CHIMIE

DENBIGH, K. G.: *The Principles of Chemical Equilibrium*. Pp. xxi + 491. Cambridge University Press, Londres. 1955. 42s.

Le Professeur Denbigh fait partager son enthousiasme pour la thermodynamique dans ce manuel profond et stimulant à l'intention des étudiants de chimie pure et de génie chimique dans leur dernière année d'étude. Les principes théoriques sont étudiés assez en détail et leurs applications sont illustrées d'une centaine au moins de problèmes, dont beaucoup ont été donnés aux examens du Diplôme d'Ingénieur Chimiste de l'Université de Cambridge. Réponses et commentaires ne sont pas oubliés.

La partie I (Principes de Thermodynamique) établit à partir de la Première et de la Seconde Lois la signification des diverses fonctions thermodynamiques et de leurs dérivées, qui sont utilisées dans la partie II (Equilibres de Phases et de Réactions) pour étudier les réactions où entrent les gaz, la règle des phases, les solutions idéales et non et les équilibres ioniques. La partie III suit le développement de la mécanique statistique et est intitulée «La Thermodynamique et l'existence des molécules». L'étude est basée sur l'œuvre de Gibbs et comprend les gaz monoatomiques, les cristaux parfaits et la Troisième Loi ainsi que de brèves introductions à la cinétique chimique, la théorie de l'état de transition, les solutions régulières et l'adsorption. Parmi les points étudiés les plus utiles, citons les conditions d'équilibre de plusieurs réactions indépendantes, la dérivation de la règle des phases et les rapports entre les expressions cinétiques des constituants directs et inverses d'une réaction. Certains seront peut-être déçus, toutefois, de ne pas trouver davantage de renseignements sur le calcul statistique des constantes d'équilibre et sur les sources de données numériques sûres.

K. W. SYKES

MARVEL, C. S., préparé par: *The Roger Adams Symposium*. Pp. ix + 140. John Wiley and Sons Inc., New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1955. 30s.

L'influence de Roger Adams sur l'histoire de l'enseignement de la chimie et de la recherche chimique avec ses applications aux Etats-Unis a été unique et s'est étendue directement et indirectement dans toutes les directions. Il a formé des chimistes en grand nombre, les aidant à publier leurs travaux et à s'adapter aux besoins de l'industrie. Il s'infiltra de plus dans tous les recoins des services publics où la chimie a droit de cité. Les six articles présentés à cette conférence en son honneur sont l'œuvre d'anciens étudiants de doctorat (1918–29) et ont tous un intérêt individuel tout en présentant dans leur ensemble une coupe des activités d'Adams. Il va sans dire qu'il y a beaucoup d'omissions, mais c'était inévitable dans les circonstances.

H. Volwiler, dépeint clairement les qualités attachantes et les travaux remarquables de l'homme qui fut le chef reconnu de la chimie américaine. Les cinq autres articles s'occupent des progrès réalisés par leurs auteurs respectifs. La partie la plus longue, œuvre de W. R. Brode constitue une monographie de valeur sur les effets stériques dans les colorants, question qu'on pourrait facilement oublier dans une étude de la relation entre la structure moléculaire et l'absorption de lumière. La notion d'interférence spatiale de groupe prend pleine signification ici et les travaux d'Adams dans ce domaine sont fondamentaux. Le Professeur Johnson présente avec lucidité son étude remarquable de la molécule bizarre de gliotoxine et le Professeur McElvain étudie les aspects chimiques de l'acide népétalique, dérivé curieux du *cyclo*pentane. Le Professeur Shriner traite de quelques réactions des sels de pyrylium. Le dernier article, de M. Stanley fait un exposé stimulant des études chimiques sur les virus. Par la variété des sujets traités, le Professeur C. S. Marvel a donné une bonne idée de l'universalité du grand chimiste dont il fut le collègue pendant de nombreuses années.

Le volume peut être vivement recommandé aux innombrables amis de Roger Adams dans le monde entier. Son intérêt est encore accru par la valeur des contributions apportées à cette remarquable conférence.

R. ROBINSON

WHELAND, G. W.: *Resonance in Organic Chemistry*. Pp. xiii + 846. Chapman and Hall Limited, Londres. 1955. 120s.

L'ouvrage précédent du Professeur Wheland, *The Theory of Resonance*, offrait le premier exposé complet de cette théorie dans son application à la chimie organique. Le livre actuel, qui dépasse entièrement l'ancien, sera une addition de valeur à la littérature car, à part quelques omissions peu importantes, il couvre le domaine entier de la résonance en chimie organique, structure et réactivité comprises. De plus, l'emploi du terme «résonance» a été élargi pour inclure l'autre interprétation possible par les orbites moléculaires. Cette modification sera la

bienvenue, car nous connaissons assez maintenant les limites et les possibilités des sortes d'approximation données par la valence et les orbites moléculaires pour ne les accepter que lorsqu'elles coïncident. Wheland écrit avec autorité sur une question qu'il connaît depuis ses débuts. Son étude de la résonance comme phénomène et comme mode de pensée et d'expression en rapport avec les molécules est particulièrement claire. On ne trouve nulle part les discussions vagues qui ont si souvent marqué l'étude des applications de la résonance par le passé. Le volume renferme une collection complète (90 pages) de longueurs et d'angles de liaisons qui rendra service à certains. Il mérite pleinement le succès de son prédécesseur. C. A. COULSON

GÉOLOGIE

GIGNOUX, M.: *Stratigraphic Geology* (4e édition). Traduit par G. G. Woodford. Pp. XVI + 698. Bailey Brothers and Swinfen Limited, Londres; W. H. Freeman and Company, Californie. 1955. $9,50.

Il est facile de critiquer une œuvre de cette ampleur. On sait que le regretté Professeur Gignoux fit des erreurs dans la première édition et ne les corrigea pas toujours dans les impressions successives. Il oublia parfois de mettre le livre à jour et de modifier des conclusions devenues périmées et fit même des modifications dans certaines sections de l'ouvrage sans tenir compte de leurs répercussions par ailleurs. Ces critiques s'appliquent également à la traduction. De plus, tout traducteur d'œuvre géologique parue cinq ans à peine auparavant doit se demander s'il lui faut récrire certaines parties ou les laisser telles quelles. Ainsi, la classification de Gignoux du Pliocène et du Pléistocène restée inchangée met l'œuvre en contradiction avec les recommandations unanimes d'un comité du Congrès International de Géologie.

La traduction est trop littérale et ne laisse jamais oublier l'origine du volume. De même, les illustrations ont été simplement photographiées sans être refaites de sorte que les diagrammes manquent de clarté.

Néanmoins, la «Géologie Stratigraphique» de Gignoux n'est pas seulement unique en son genre. C'est presque un chef d'œuvre. Elle est indispensable à l'étudiant, professionnel ou amateur, et cette traduction la rend accessible à une foule de lecteurs qui ne pourraient autrement l'apprécier à sa juste valeur. Les éditeurs et le traducteur méritent donc toute notre gratitude. F. W. SHOTTON

TERMIER, H. et TERMIER, G.: *L'évolution de la lithosphère. I. Pétrogenèse.* Pp. 653. Masson et Cie., Paris. 1956. Broché, 8000 fr.; lin, 8800 fr.

On ne peut manquer d'admirer le zèle des auteurs quand on remarque que cette œuvre monumentale ne forme qu'une partie d'une série à paraître de 4 volumes intitulée «Traité de Géologie». Ce volume sera le second de la série et traite de l'origine des roches pyrogènes et métamorphiques. Les auteurs insistent tout au long que la meilleure façon d'aborder les questions de pétrologie est de les replacer dans leur cadre géologique. Ils ont fait, dans ce but, une utile synthèse des travaux récents sur la parenté des roches afin d'illustrer leur argumentation. Leurs propres recherches et celles de leurs collègues en Afrique du Nord ne sont pas oubliées mais ils ont aussi tiré des exemples de tous les coins du globe. Certains de ces travaux auraient gagné à être examinés sous un angle plus critique Ainsi, l'interprétation transformiste du complexe du Bushveldt est si longuement décrite que le lecteur non averti pourrait penser qu'il n'en existe pas d'autre.

Les chapitres de début traitent avec clarté et originalité de points tels que la structure et la croissance cristallines, la géochimie, les sources d'énergie à l'intérieur de la terre et l'âge du globe. Le corps de l'ouvrage demande une certaine connaissance des rudiments de la pétrologie et celui qui les possède sera captivé par cette étude des roches dures. Le texte est clair et les cartes et diagrammes excellents, quoique pas assez nombreux. H. H. READ

MÉDECINE

British Pharmacopoeia 1953: *Addendum* 1955. Pp. XVII + 94. The Pharmaceutical Press, Londres. 1955. 21s.

La parution d'un supplément au Codex britannique deux ans seulement après la dernière édition, suivant elle-même la précédente à cinq ans de distance, indique nettement le désir de la Commission pharmaceutique de tenir l'ouvrage au courant des derniers apports. L'addition la plus intéressante au point de vue général est sans doute celle des comprimés d'aspirine soluble, qui devra permettre d'acheter sous peu ce produit meilleur marché qu'à l'heure actuelle. Il y a plusieurs monographies nouvelles sur des médicaments importants, comme le cortisone et l'oxytétracycline.

La Commission a rejeté peu à peu les préjugés qui décidaient autrefois du contenu des monographies, si bien que le Codex anglais rend maintenant service à tout le monde, excepté au médecin. On y trouve, par exemple, des paragraphes sur le citrate de diéthylcarbamazine, l'acide iopanoïque, la phénindione et autres composés dont pas un médecin sur mille ne connaîtrait l'usage. Ne pourrait- on pas ajouter quelques indications? Dans certains cas pourtant, comme pour la dose d'acétate de cortisone, les emplois commencent à figurer. Il est grand temps que la Commission prenne l'initiative sur ce sujet. J. H. BURN

RHOADS, C. P., publié par: *Antimetabolites and Cancer.* Pp. VI + 312. American Association for the Advancement of Science, Washington. 1955. $5,75.

Cette série d'articles, présentés à une conférence tenue en décembre 1953, est toujours actuelle sur la plupart des points essentiels. Des contributions remarquables de Hitchings, Burchenal, Mandel, Lansford et Shive, Parks et G. B. Brown traitent d'aspects très étudiés de l'emploi de la purine et de la pyrimidine ainsi que d'analogues de l'acide folique comme antimétabolites et fait le point des connaissances sur leur rapport avec le traitement des tumeurs malignes expérimentales et cliniques.

A ce propos, les articles de Skipper, et de Nichol et Welch sur le développement de la résistance par A-méthoptérine et 8-azaguanine sont particulièrement intéressants. Woolley décrit l'arrêt de croissance de tumeurs chez la souris par 1;2-diamino-4;5-diméthylbenzène (dérivé précédent de la vitamine B_{12}) et, parmi plusieurs articles notables sur les aspects moins connus du sujet, citons les recherches de Nickell sur la croissance et les tumeurs végétales, de Totter sur l'effet de l'aminoptérine sur la moelle osseuse, de Visser sur l'emploi de la nucléotide et des analogues de la nucléoside comme antimétabolites et de Nelson sur l'effet des anti-métabolites dans la formation d'anomalies fœtales. Un article intéressant de Weinhouse sur le métabolisme des hydrates de carbone dans les cellules tumorales, met à jour ce

point important mais assez négligé.

Nous recommandons vivement cet ouvrage à ceux qui recherchent un exposé faisant autorité sur l'ensemble des travaux concernant les antimétabolites qui ont été l'objet d'études poussées. G. M. TIMMIS

WELLER, Carl V.: *Causal Factors in Cancer of the Lung*. Pp. VIII + 113. Charles C. Thomas, Springfield; Blackwell Scientific Publications Limited, Oxford. 1956. 21s. 6d.

Le livre du Dr. Weller concerne le grand point d'interrogation actuel: les cigarettes sont-elles la cause principale de l'énorme accroissement du nombre de cas de cancer pulmonaire depuis quelques dizaines d'années? Les preuves mises à jour par les travaux des Kennaway, de Doll et Hill, Clemmesen, Dorn, Cutler et Loveland, Hammond et Horn entre autres y sont présentées de façon modérément technique.

L'auteur utilise d'abord les faits statistiques pour l'étude du sujet, puis examine la mortalité effrayante due au cancer du poumon chez les travailleurs des mines de Schneeberg et de Joachimsthal; il y a quelques illustrations intéressantes de mineurs d'après des gravures sur bois datant de 1556. Il passe ensuite en revue les agents et les états soupçonnés de provoquer le cancer du poumon: arsenic, radioactivité, silicose, asbestose, pneumonite, chromates, benzpyrène, impuretés atmosphériques, développement de l'urbanisme et tabac.

Mais, tout en ayant prouvé pour ainsi dire la responsabilité du tabac dans 80% des cas de cancer pulmonaire, le Dr. Weller se montre extrêmement réticent sur le sujet des mesures préventives. Il se contente d'en passer le fardeau à deux chercheurs de tempérament plus hardi, Maisin et Clemmesen, dont il cite un passage écrit en 1952: «Souhaitons de montrer le sens pratique de nos ancêtres et ne cherchons pas de preuves directes avant d'avoir converti notre expérience en mesures pratiques.» I. HIEGER

PHYSIQUE

Fifth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute. Pp. XXVI + 802. Reinhold Publishing Co., New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1955. 120s.

Depuis la guerre, trois colloques internationaux importants sur la combustion ont eu lieu en Amérique: l'un à l'Université du Wisconsin en 1948, un second à Pittsburgh en 1952 et le dernier, dont il est question ici, à l'Institut de Technologie du Massachusetts en 1954. Celui de Pittsburgh insistait davantage sur les aspects physiques de la combustion et celui du Massachusetts sur la combustion dans les moteurs et la cinétique du phénomène.

L'ouvrage renferme 11 articles de revue, dont 6 traitent de questions reliées aux divers types de moteurs et 5 de cinétique. Les quatre-vingt-dix articles restants sont originaux. Des 101 articles, 59 proviennent des Etats-Unis et 24 de Grande-Bretagne. Un grand nombre de contributions nouvelles décrivent des travaux déjà parus ou devant paraître ailleurs, mais à mesure que croît la réputation des colloques, les auteurs ont tendance à utiliser exclusivement les compte rendus de ces conférences, édités actuellement par le nouvel Institut de la Combustion, pour la publication de leurs œuvres. Ces volumes seront donc bientôt l'unique source de contributions originales sur certains points et renseigneront également à peu d'exceptions près sur les tendances courantes de la recherche. Défaut secondaire de présentation: l'absence de sommaires en tête des articles. A. G. GAYDON

HALLIDAY, David: *Introductory Nuclear Physics* (2e édition). Pp. IX + 493. John Wiley and Sons Inc., New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1955. 60s.

Il existe maintenant plusieurs ouvrages élémentaires de physique nucléaire, mais par son envergure seule, ce volume est probablement unique. Tous les aspects concevables du sujet sont traités et l'impressionnante liste bibliographique semble complète jusqu'à la fin de 1954. C'est véritablement une introduction magistrale à l'ensemble de la physique nucléaire. Ajoutons que le livre est bien écrit avec des diagrammes clairs et un index excellent et il semblerait sans défauts.

Ce n'est pas le cas cependant. Le terrain couvert est si vaste qu'à presque chaque page on trouve l'irritante expression: «on peut montrer . . .». De plus, les notes renvoient fréquemment à des publications originales de difficulté bien supérieure à celle du livre, même lorsque la question a été traitée depuis longtemps dans des ouvrages ou articles de revue. Une liste raisonnable de livres et d'articles à consulter serait certainement plus utile à l'étudiant et annulerait presque, sinon complètement, la critique ci-dessus.

Un court chapitre sur la mécanique quantique élémentaire fait une addition inattendue à cette seconde édition, car il faudrait avoir des connaissances beaucoup plus poussées sur cette question avant d'aborder ce volume. L. R. B. ELTON

PAULI, W., ROSENFELD, L. et WEISSKOPF, V., publié par: *Niels Bohr, and the Development of Physics*. Pp. VII + 195. Pergamon Press Limited, Londres. 1955. 30s.

Deux de ces essais (Darwin, Heisenberg) sont historiques et les autres, œuvre de savants éminents de sept pays différents, concernent l'avenir et traitent de problèmes aux confins de la théorie quantique. Fidèle à son but, cette publication commémorative offre une richesse d'information peu commune sur l'état de choses à de nombreux points de croissance de la physique fondamentale, comme les rapports de la théorie quantique et de la relativité, l'électrodynamique quantique, la supraconductibilité et le noyau.

Mais il y a un inconvénient, car l'esprit de Bohr hante la fête, nous rappelant ironiquement ce qui manque aujourd'hui. La plupart des auteurs pensent, en effet, que l'«âge de Bohr» est presque terminé, que l'influence du «principe de correspondance» faiblit et que la recherche théorique repose obligatoirement de plus en plus sur la virtuosité mathématique. Le compte rendu des derniers travaux sur l'interprétation quantique des champs (Landau, de Moscou) fait pressentir des modifications capitales dans la théorie des mésons. Et pourtant, il devient de plus en plus douteux que des considérations purement mathématiques puissent fournir l'aide nécessaire sur ce point et dans d'autres problèmes pressants. Une version nouvelle de l'atomisme, débarrassée de quelque aspect superflu encore présent dans les méthodes actuelles et une épistémologie plus approfondie de la mesure sont peut-être nécessaires à la découverte qui réduira les complexités courantes et marquera le début d'une ère nouvelle. L. L. WHYTE

Livres reçus

(*Note.* La mention d'un livre à cette page n'exclut pas sa revue ultérieure.)

ART DE L'INGÉNIEUR

CEAGLSKE, N. H.: *Automatic Process Control for Chemical Engineers.* Pp. XIV + 228. John Wiley and Sons Inc., New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1956. 54s.

MAZZOLENI, F.: *Ingegneria Nucleare.* Pp. XII + 470. Ulrico Hoepli, Milan. 1956. 4000 lires.

OLDENBURGER, R., publié sous la direction de: *Frequency Response.* Pp. XII + 372. The Macmillan Company New-York. 1956. 52s. 6d.

OTHMER, D. F., publié sous la direction de: *Fluidization.* Pp. IX + 231. Reinhold Publishing Corporation, New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1956. 56s.

PERUCCA, Eligio, publié sous la direction de: *Dizionario d'Ingegneria.* Vol. V, *RUM–Z.* Pp. XII + 1046. Unione Tipografico-Editrice Torinese, Turin. 1956. 12 000 lires.

ASTRONOMIE

MOORE, Patrick: *The Planet Venus.* Pp. 132. Faber and Faber Limited, Londres. 1956. 15s.

BIOCHIMIE

GRAFF, Samuel, publié sous la direction de: *Essays in Biochemistry.* Pp. X + 345. John Wiley and Sons Inc., New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1956. 52s.

BIOLOGIE

CAHN, Théophile: *La régulation des processus métaboliques dans l'organisme.* Pp. XII + 681. Presses Universitaires de France, Paris. 1956. 3000 fr.

GOFF, Loyal G., publié sous la direction de: *Proceedings of the Underwater Physiology Symposium.* Pp. XI + 153. National Academy of Sciences, Washington. 1955. $1,50.

MATTHES, H. W.: *Einführung in die Mikropaläontologie.* Pp. VIII + 348. S. Hirzel Verlag, Leipzig. 1956. DM. 33,40.

TUCHMANN-DUPLESSIS, H.: *Hormones hypophysaires somatotrope et corticotrope. Croissance et métabolisme.* Pp. 319. Masson et Cie, Paris. 1956. 2200 fr.

BOTANIQUE

A Book of Wild Flowers. 160 Planches d'après aquarelles d'Elsa Felsko. Annotations de Sheila Littleboy. Pp. XI + 231. Bruno Cassirer, Oxford; Faber and Faber Limited, Londres. 1956. 35s.

CHIMIE

FROMHERZ, Hans: *Physikalisch-chemisches Rechnen in Wissenschaft und Technik.* Pp. IX + 316. Verlag Chemie G.m.b.H., Weinheim/Bergstr. 1956. DM. 32,50.

Geochemistry of Iodine. Bibliography 1825–1954. Pp. VIII + 150. Chilean Iodine Educational Bureau, Londres. 1956.

LOCHTE, H. L. et LITTMANN, E. R.: *The Petroleum Acids and Bases.* Pp. 368. Constable and Company Limited, Londres. 1956. 50s.

Modern Chemical Processes. Vol. IV. Publié par la rédaction de *Industrial and Engineering Chemistry.* Pp. V + 202. Reinhold Publishing Corporation, New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1956. 40s.

OLSON, A. R., KOCH, C. W. et PIMENTEL, G. C.: *Introductory Quantitative Chemistry.* Pp. X + 470. W. H. Freeman and Company, San Francisco; Bailey Bros. and Swinfen Limited, Londres. 1956. 42s. 6d.

STRAFFORD, N., STROUTS, C. R. N. et STUBBINGS, W. V., publié sous la direction de: *The Determination of Toxic Substances in Air.* Pp. XXVII + 226. W. Heffer and Sons Limited, Cambridge. 1956. 35s.

CRISTALLOGRAPHIE

CHUDOBA, K. F. et GUBELIN, E. J.: *Echt oder synthetisch?* Pp. 156. Rühle-Diebener-Verlag K.G., Stuttgart. 1956. DM. 18,50.

MATHÉMATIQUES

VAJDA, S.: *The Theory of Games and Linear Programming.* Pp. 106. Methuen and Company Limited, Londres; John Wiley and Sons Inc., New-York. 1956. 8s. 6d.

WILKES, M. V.: *Automatic Digital Computers.* Pp. X + 305. Methuen and Company Limited, Londres. 1956. 42s.

MÉDECINE

CHAUCHARD, P.: *Les mécanismes cérébraux de la prise de conscience.* Pp. 240. Masson et Cie, Paris. 1956. 1300 fr.

KLINE, N. S., publié sous la direction de: *Psychopharmacology.* Publication No. 42 de l'American Association for the Advancement of Science, Washington; Bailey Bros. and Swinfen Limited, Londres. 1956. 32s.

WOLSTENHOLME, G. E. W. et O'CONNOR, C. M., publié sous la direction de: *Ciba Foundation Colloquia on Endocrinology.* Vol. IX. *Internal Secretions of the Pancreas.* Pp. XII + 292. J. and A. Churchill Limited, Londres. 1956. 40s.

WOLSTENHOLME, G. E. W. et O'CONNOR, C. M., publié sous la direction de: *Histamine (Ciba Foundation Symposium in honour of Sir Henry Dale).* Pp. XVI + 472. J. and A. Churchill Limited, Londres. 1956. 50s.

PHYSIQUE

CRANK, J.: *The Mathematics of Diffusion.* Pp. VI + 347. Clarendon Press, Oxford; Geoffrey Cumberlege, Londres. 1956. 50s.

GRIGOR'EV, I. A.: *Measurement of Small Holes.* (Traduit du russe par le Department of Scientific and Industrial Research.) Pp. X + 137. Her Majesty's Stationery Office, Londres. 1956. 8s. 6d.

WOLFE, H. C., publié sous la direction de: *Temperature. Its Measurement and Control in Science and Industry.* Vol. II. Pp. X + 467. Reinhold Publishing Corporation, New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1955. 96s.

TECHNOLOGIE

BERTIN, Leonard: *Atom Harvest.* Pp. 253. Secker and Warburg, Londres. 1955. 20s.

CAMPBELL, I. E., publié sous la direction de: *High Temperature Technology.* Pp. XIV + 526. John Wiley and Sons Inc., New-York; Chapman and Hall Limited, Londres. 1956. 120s.

COUZENS, E. G. et YARSLEY, V. E.: *Plastics in the Service of Man.* Pp. 315. Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex. 1956. 3s. 6d.

JONES, G. O.: *Glass.* Pp. VI + 119. Methuen and Company Limited, Londres; John Wiley and Sons Inc., New-York. 1956. 8s. 6d.

Notes biographiques sur les collaborateurs

H.E. HUXLEY

Naquit en 1924 et fit ses études à *Christ's College*, Cambridge. Fit des travaux au Centre du Medical Research Council au *Cavendish Laboratory*, Cambridge (1948–52). Il passa ensuite deux ans aux Etats-Unis comme boursier du Commonwealth et y poursuivit ses travaux sur le muscle tout en s'intéressant fortement à la microscopie électronique. De retour à Cambridge, il devint Fellow de *Christ's College*. Il est actuellement Externe du Medical Research Council et Associé de recherche au Département de Biophysique à l'Université de Londres, où il étudie particulièrement la constitution moléculaire des organismes biologiques par la microscopie électronique et autres méthodes.

SIR EDWARD BULLARD

Naquit en 1907 et étudia à *Clare College*, Cambridge. En 1931 il se spécialisa en géophysique et exécuta des travaux expérimentaux sur la gravité, la sismologie et la mesure des courants de chaleur sur terre et en mer. De 1950 à 1955 il dirigea le *National Physical Laboratory* et est actuellement Directeur-adjoint des recherches de Géophysique à l'Université de Cambridge. Il a beaucoup écrit sur l'origine du champ magnétique terrestre et sur l'hydrodynamique magnétique.

G. TEMPLE

Naquit en 1901 et fit ses études à l'Université de Londres et à *Trinity College*, Cambridge. De 1932 à 1953 il fut Professeur de Mathématiques à *King's College*, Université de Londres. Il occupe actuellement la chaire Sedley de Physique à l'Université d'Oxford où il est Fellow de *Queen's College*. Il a écrit plusieurs ouvrages sur la théorie des quanta et autres aspects de la physique mathématique.

C. DODD

Naquit en 1914 et fit ses études à l'Université de Londres. Il est maintenant maître de conférences à *University College*, Londres. Ses travaux ont porté sur les propriétés physiques des liquides à l'état normal, surfondu et surchauffé. En 1955, une bourse de la Fondation Astor lui permit d'aller étudier les chambres à bulles à l'Université de Michigan et les divers perfectionnements de ces nouveaux détecteurs dans d'autres régions des Etats-Unis.

T. M. HARRIS

Né à Leicester en 1903. Etudia la paléo-botanique à Nottingham et à Cambridge. Nommé Professeur de Botanique à *Reading University* en 1934. Fit partie de l'expédition géologique danoise sur la côte est du Groenland en 1926–27. A écrit de nombreux articles sur la végétation fossile du Groenland et, plus tard, de la côte du Yorkshire.

R. D. KEYNES

Né à Londres en 1919; étudia à *Trinity College*, Cambridge. Fellow de *Peterhouse* depuis 1952 et maître de conférences de Physiologie depuis 1953. Ses recherches depuis 1946 ont porté surtout sur l'emploi des isotopes radioactifs dans l'étude des échanges ioniques dans les fibres nerveuses et musculaires. En 1951 il passa trois mois à l'Institut de Biophysique de l'Université de Rio de Janeiro, Brésil à titre de chargé de cours invité.